

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

**“Estudos de correlação entre concentração magnética em
escala de bancada, piloto e industrial”**

Autor: Nilson Nedes de Paula

Orientador: Prof. Dr. George Eduardo Sales Valadão

Fevereiro/2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Nilson Nedes de Paula

**ESTUDOS DE CORRELAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA EM
ESCALA DE BANCADA, PILOTO E INDUSTRIAL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e
de Minas da Universidade Federal de Minas
Gerais

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Dr. George Eduardo Sales Valadão

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

Fevereiro de 2014

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS e a todos que, direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho e especialmente.

À minha amada esposa, companheira, amiga e paciente.

Ao meu filho Matheus, simplesmente pelo fato dele existir em minha vida.

Aos meus pais pelo amor incondicional.

À Vale, pela oportunidade de desenvolver algo novo e importante dentro da empresa.

Aos Gerentes Marco Túlio e Leonardo Queiroz, pelo subsídio técnico e suporte para realização deste trabalho.

Ao meu orientador e professor da UFMG George Eduardo Sales Valadão, pela orientação e conselhos.

Ao professor da UFMG Antônio Eduardo Clark Peres, pela amizade e orientação que, em muito contribuiu para a realização deste trabalho.

À todos os meus colegas do Centro de Pesquisas Tecnológicas da Vale.

Aos meus amigos Gunter Lipper, Cristiano Sales, Alysson Borges, Rafael Bires, Reginaldo Cristiano, Jonathan Melo, Rodrigo Fina e Marcos Henrique, pela amizade e companheirismo.

À Gerência de Desenvolvimento de Processos de Tratamento de Minério (GADMF), destacando Michelle Marques, Ivan Pena e Nilton Torquato, responsáveis pelo meu desenvolvimento profissional.

À CAPES/PROEX, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro ao PPGEM.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. Origem das propriedades magnéticas dos minerais	20
3.2. Determinação das propriedades magnéticas dos minerais	22
3.1. Separadores magnéticos de alta intensidade (WHIMS).....	26
3.2. Microscopia ótica (FAULSTICH, 2008)	27
3.3. Quantificação mineralógica em microscópio ótico (*)	30
3.4. Aspectos gerais sobre concentração magnética (*).....	45
3.5. Concentradores magnéticos utilizados pelo Centro de Pesquisas Tecnológicas da Vale (CPT) na caracterização tecnológica de minério de ferro.	50
3.6. Aplicação de concentradores eletromagnéticos WHIMS nas plantas de beneficiamento da Vale (*).....	53
3.7. Desenvolvimento de um modelo para concentradores magnéticos de alta intensidade (SCHNEIDER e CALIXTO, 2006).....	56
4. METODOLOGIA	64
4.1. Escolha das amostras.....	65
4.2. Amostragem industrial	65
4.3. Caracterização das amostras	66
4.3.1. Análise química por fluorescência de raios X.....	66
4.3.2. Análise mineralógica em microscopia ótica	66

4.4.	Interpretação mineralógica.....	67
4.5.	Testes em escala piloto e bancada.....	68
4.5.1.	Testes em escala piloto.....	68
4.2.1.	Testes em escala de bancada	69
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
5.1.	Análise química.....	72
5.2.	Análise mineralógica.....	73
5.3.	Interpretação mineralógica.....	75
5.4.	Resultados dos testes piloto	77
5.5.	Resultados dos testes de bancada.....	78
5.6.	Análise de correlação dos resultados bancada versus piloto.....	83
6.	CONCLUSÕES	89
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
9.	ANEXOS	94
9.1.	Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones de Cauê (Teste 01 a 12).	94
9.2.	Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones de Cauê (Teste 13 a 24).	95
9.3.	Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones de Alegria (Teste 01 a 12).	96

9.4. Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones de Alegria (Teste 13 a 25).	97
9.5. Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones <i>rougher</i> de Brucutu (Teste 01 a 12).....	98
9.6. Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones <i>rougher</i> de Brucutu (Teste 13 a 25).....	99
9.7. Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones <i>cleaner</i> de Brucutu (Teste 01 a 12).....	100
9.8. Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones <i>cleaner</i> de Brucutu (Teste 13 a 25).....	101
9.9. Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones <i>rougher</i> do Pico (Teste 01 a 12).	102
9.10. .Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones <i>rougher</i> do Pico (Teste 13 a 25).	103

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1– Representação das forças que atuam em uma partícula quando esta está na calha do separador isodinâmico Frantz. FG representa o peso da partícula e FM representa a força exercida pelo campo magnético (NESSET e FINCH, 1980). 24
- Figura 3.2 – Ilustração dos pacotes magnéticos localizados na circunferência de dois rotores equipados com certo número de placas ranhuradas equidistantes umas das outras (WASMUTH e UNKELBACH, 1991)..... 26
- Figura 3.3 – Representação das configurações mais comuns com 4, 8 e 12 ranhuras por polegada ao longo do comprimento da placa (WASMUTH e UNKELBACH, 1991)... 26
- Figura 3.4 – Exemplo de microscópio ótico petrográfico (Axioskop 40 Pol da Zeiss).. 30
- Figura 3.5 – Sistema de observação microscópica (www.rc.unesp.br/igce/petrologia). 31
- Figura 3.6 – Grade do microscópio para estimativa de área das partículas (*). 33
- Figura 3.7 – Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida - nicóis paralelos (direita) e cruzados (esquerda). Partículas formadas por hematita microcristalina (*). . 34
- Figura 3.8 - Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida - nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Cristais de hematita especular (*). 34
- Figura 3.9 – Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida - nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Partículas contendo cristais de hematita lamelar (*). ... 35
- Figura 3.10 – Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida - nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Partícula contendo cristais de hematita granular (*). ... 35

- Figura 3.11 – Fotomicrografias - microscópio ótico de luz refletida - nicois cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Partícula contendo cristais de hematita sinuosa (*). 36
- Figura 3.12 – Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicois cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Cristais de hematita martítica (*). 37
- Figura 3.13 – Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicois cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Cristais de magnetita (*). 37
- Figura 3.14 – Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicois cruzados. Tipos morfológicos de goethita compacta (*). 38
- Figura 3.15 – Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicois cruzados. Partículas contendo goethita terrosa (*). 39
- Figura 3.16 – Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicois paralelos (esquerda) e cruzados (direita). Cristais de quartzo (*). 40
- Figura 3.17 – Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicois paralelos (esquerda) e cruzados (direita). Partículas contendo gibbsita (*). 41
- Figura 3.18 – Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicois cruzados. Partícula de caulinita (*). 41
- Figura 3.19 – Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicois paralelos. Minerais manganésíferos (*). 42
- Figura 3.20 – Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicois paralelos (esquerda) e cruzados (direita). Cristal de muscovita (*). 43
- Figura 3.21 – Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida. Exemplos de cristais de sulfeto, carbonato e silicato, quantificados como “Outros” (*). 43

Figura 3.22 – Reprodução esquemática do processo de separação magnética (SVOBODA, 2004).	46
Figura 3.23 – Indução magnética para diferentes espécies mineralógicas (a) ferromagnéticos, (b) paramagnéticos e (c) diamagnéticos (SAMPAIO e LUZ, 2004). .	47
Figura 3.24 - Características de quartzo grosso, com inclusões de óxido ferroso e rugosidade elevada (*).	48
Figura 3.25 - Minerais com porosidade elevada: goethita com disseminação de quartzo e hematita (*).	49
Figura 3.26 – Fotomicrografias (microscópio ótico de luz refletida): minerais magnéticos (ferromagnéticos), paramagnéticos e diamagnéticos (*).	49
Figura 3.27 – Concentrador eletromagnético Tubo Davis (*).	50
Figura 3.28 – Concentrador eletromagnético L4 (*).	51
Figura 3.29 – Concentrador eletromagnético WDL8 (*).	51
Figura 3.30 – Concentrador magnético WDRE (*).	52
Figura 3.31 – Concentrador eletromagnético Minimag (*).	52
Figura 3.32 – Concentrador Jones DP-317 (*).	54
Figura 3.33 – Concentrador Jones WHC-150-DL (*).	55
Figura 3.34 – Concentrador Jones modelo G-3200 (*).	56

Figura 3.35 - Esquema básico de modelamento do concentrador Jones (SCHNEIDER e CALIXTO, 2006).....	61
Figura 3.36 - Mudança de potencial quando uma partícula muda de posição em leito de partículas (SCHNEIDER e CALIXTO, 2006).	62
Figura 4.1 – Fluxograma simplificado da metodologia do trabalho.....	64
Figura 5.1 – Quantificação mineralógica estimada em massa.....	74
Figura 5.2 – Fotomicrografias da fração global das amostras.	74
Figura 5.3 – Estimativa mineralógica versus resultados testes de bancada – Amostra Global.....	76
Figura 5.4 – Estimativa mineralógica versus resultados testes de bancada – Amostra Fracionada.....	76
Figura 5.5 – Gráficos de correlação dos resultados piloto versus industrial.	77
Figura 5.6 – Resumo dos resultados dos testes de bancada realizados com a amostra de alimentação do Jones de Finos da Usina Cauê.	79
Figura 5.7 – Resumo dos resultados dos testes de bancada realizados com a amostra de alimentação do Jones da Usina de Alegria.	80
Figura 5.8 – Resumo dos resultados dos testes de bancada realizados com a amostra de alimentação do Jones <i>rougher</i> de Brucutu.....	81
Figura 5.9 – Resumo dos resultados dos testes de bancada realizados com a amostra de alimentação do Jones <i>cleaner</i> de Brucutu.....	82

Figura 5.10 – Resumo dos resultados dos testes de bancada realizados com a amostra de alimentação do Jones *rougher* de Pico. 83

Figura 5.11 – Gráficos de correlação dos resultados bancada versus piloto (1ª batelada de testes. 85

Figura 5.12 – Gráficos de correlação dos resultados bancada versus piloto (acumulado 1ª e 2ª batelada de testes. 87

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 – Íons mais comuns dos elementos de transição, sua configuração eletrônica e momento magnético expresso em termos do magnéton de Bohr (KLEIN e DUTROW, 2007b).....	21
Tabela III.2 – Composição química média dos minerais (*).....	44
Tabela III.3 – Balanço de massas: dados simulados versus medidos (SCHNEIDER e CALIXTO, 2006).....	63
Tabela III.4 – Balanço mineralógico (percentual de quartzo): dados simulados versus medido (SCHNEIDER e CALIXTO, 2006).....	63
Tabela IV.1 – Parâmetros para os testes piloto de concentração magnética.	69
Tabela IV.2 – Parâmetros para os testes de concentração magnética de bancada.	71
Tabela V.1 – Análise química das amostras.	72
Tabela V.2 – Quantificação mineralógica estimada em massa.	73
Tabela V.3 – Estimativa mineralógica de recuperação mássica e teor de SiO ₂ para concentrado.	75
Tabela V.4 – Resultados dos testes piloto versus industrial.	78
Tabela V.5 – Resultados dos testes de bancada versus piloto (1ª batelada de testes). ...	84
Tabela V.6 – Resultados dos testes bancada versus piloto (2ª batelada de testes).	86
Tabela V.7 – Comparativo dos resultados piloto real versus piloto calculado.....	88

RESUMO

Este trabalho visa apresentar os resultados de um estudo de correlação envolvendo concentração magnética nas escalas bancada-piloto e piloto-industrial. Os testes que sustentam este estudo foram realizados no CPT (Centro de Pesquisas Tecnológicas da Vale). A correlação entre as escalas piloto-industrial tende a ser forte, uma vez que, concentradores magnéticos piloto possuem os mesmos mecanismos de atuação de um industrial. Por outro lado, entende-se que a correlação entre as escalas bancada-piloto não seja tão direta assim, requerendo um entendimento maior para descrevê-la. Geralmente um teste piloto de concentração magnética consome uma quantidade muito grande de amostra, além de necessitar de um número maior de pessoas para sua realização. Pela dificuldade em realizar testes piloto com amostras de furo de sonda e pela incerteza de utilização direta dos resultados obtidos em bancada, há necessidade de estudar e buscar um melhor entendimento sobre as correlações existentes entre as escalas: bancada, piloto e industrial. Aproveitou-se este trabalho também para estudar uma forma de melhorar o modelo atual utilizado pelo CPT em interpretações mineralógicas voltadas para concentração magnética. A metodologia deste trabalho foi dividida em seis etapas distintas: escolha das amostras, amostragem industrial, caracterização das amostras, interpretação mineralógica, testes piloto, testes de bancada e análise de correlação. A primeira batelada de testes foi realizada com cinco amostras escolhidas no início do trabalho: alimentação do Jones de Finos de Cauê, Jones de Alegria, Jones *rougher* de Brucutu, Jones *cleaner* de Brucutu e Jones *rougher* do Pico. Para todas elas, foram realizados testes piloto, teste de bancada, análise granuloquímica e análise/interpretação mineralógica. A segunda batelada de testes foi realizada com cinco amostras oriundas da barragem de Fábrica (unidade operacional da Vale localizada às margens da BR 040 a aproximadamente 70km de Belo Horizonte). Para essas amostras foram realizados somente testes de bancada e testes piloto. Em relação aos resultados, este trabalho confirmou a interpretação mineralógica como uma boa ferramenta para estimar recuperação mássica e qualidade de concentrado em processos de concentração magnética, e que o modelo utilizado atualmente pelo CPT apresentou melhores resultados em relação à modificação proposta neste trabalho (realizar a interpretação mineralógica com a amostra fracionada nas faixas granulométrica

>0,045mm e <0,045mm). Os testes piloto apresentaram resultados praticamente idênticos aos resultados industriais, mostrando correlações fortes com R^2 acima de 0,97, o que de certa forma confirma a afirmativa de que a correlação entre as escalas piloto-industrial é direta. Foi verificado que, para a maioria das amostras estudadas, os testes de bancada apresentaram, em relação a piloto, menores teores de SiO_2 no concentrado e maiores teores de Fe no rejeito. Por fim, este trabalho confirma que é possível correlacionar os resultados obtidos nos testes de bancada com os resultados piloto. Os gráficos de correlação apresentam R^2 superior a 0.77, podendo se basear na utilização de equações de regressão para estimar resultados piloto, a partir dos resultados de bancada. Entretanto, entende-se que, para isso seria necessário a realização de testes complementares, uma vez que o espaço amostral (número de amostras estudadas) foi pequeno.

ABSTRACT

This work presents the results of a correlation study involving magnetic concentration in pilot-industrial and laboratory-pilot scales. The tests that support this study were carried out in TRC (Vale Company Technology Research Center). The correlation between the pilot and industrial scale tends to be straightforward, once that pilot magnetic concentrators are similar industrial magnetic concentrators. Moreover, it's understood that the correlation between laboratory and pilot scales is not as straightforward. They require a greater understanding/knowledge to describe them. Usually a magnetic concentration test pilot consumes a large amount of sample and requires many people for carry out it. There is necessity studying more correlations between: laboratory, pilot and industrial scales, because difficulty in carry out pilot tests with borehole samples and uncertainty of the results obtained in laboratory. Also took up this work to study a way improving the current model used by TRC in mineralogical interpretations about magnetic concentration process. The study methodology was divided in six phase: choice of samples, industrial sampling, characterization of the samples, mineralogical interpretation, pilot test, laboratory test and correlation analysis. The first batch of tests was carried out with five samples: Cauê Jones feeding, Alegria Jones, Brucutu rougher Jones, Brucutu cleaner Jones and Pico rougher Jones. For all them, pilot testing, laboratory testing, size analysis and mineralogical interpretation were carried out. The second batch of tests was conducted with five samples from dam Fábrica, Vale Company operating unit, located along the federal highway 040 to approximately 70 kilometers from Belo Horizonte city. For these samples only laboratory tests and pilot tests were carried out. Regarding the results, this study confirms the mineralogical interpretation as a good way to estimate mass recovery and concentrate quality in magnetic concentration process. Moreover and model currently used by TRC presents better results compared to modifications proposed this paper. The pilot tests results are similar to industrial results, confirming the correlation between pilot and industrial scales is straightforward. It was checked that, for most of samples studied, the laboratory tests in comparison to pilot, present lower contents of SiO₂ on concentrate and higher contents of Fe on tailings. Finally, this study confirms that's

possible to correlate the laboratory and pilot results, using regression equations to estimate pilot results from laboratory results, once that the graphs presents good correlation. However, it's understood that for this work woud be necessary to perform additional tests, once the sample space is small.

1. INTRODUÇÃO

A indústria de minério de ferro dos tempos atuais tem cada vez mais investido em estudos de caracterização tecnológica envolvendo o processo de concentração magnética. Isso se deve em muito a uma boa eficiência desse processo frente aos minérios atuais, associado a uma maior exigência do mercado em relação à qualidade dos produtos de minério de ferro.

Com a redução dos teores de ferro, a redução do grau de liberação do quartzo e o maior nível de hidratação dos minérios encontrados nas principais jazidas de todo o mundo, o processo de concentração magnética surge como uma das principais operações unitárias responsáveis pela difícil tarefa de separar os minerais de ferro do principal mineral de ganga, o quartzo. Outro ponto extremamente relevante é o grande desenvolvimento tecnológico envolvendo equipamentos de concentração magnética. Isso, devido em muito a uma forte necessidade do mercado, que acaba fomentando este nicho e promovendo o aumento significativo de modelos de concentradores magnéticos disponíveis para o mercado de minério de ferro.

A caracterização tecnológica de minérios é ferramenta importante no aproveitamento de um recurso mineral de forma otimizada, sendo recomendada nas fases de exploração e exploração de um bem mineral. Geralmente, uma estrutura de caracterização tecnológica, empregada na definição e/ou melhoria de circuitos de concentração magnética, engloba testes em escala de laboratório, piloto e industrial, tendo como suporte análises física, química e principalmente mineralógica. No entanto, a associação da caracterização tecnológica com essas análises deve constituir a etapa inicial, uma vez que ela é responsável por fornecer diretrizes para as etapas subsequentes.

A caracterização tecnológica pode ser compreendida como sendo um conjunto de estudos que tem como objetivo testar um determinado minério quanto ao seu desempenho em diversos processos de beneficiamento mineral por meio de ensaios nas escalas de laboratório, bancada e planta piloto, utilizando-se o conhecimento das propriedades deste minério. O estágio final da caracterização tecnológica é o desenvolvimento de um fluxograma viável de processamento para concentração do minério estudado.

No CPT (Centro de Pesquisas Tecnológicas da Vale), os testes de concentração magnética em escala de laboratório são realizados em concentradores estáticos de bancada e os testes piloto são realizados em três tipos de equipamento: dois de tambor e um de carrossel, sendo este último WHIMS (*wet high intensity magnetic separator*). O teste piloto de concentração magnética consome uma quantidade muito grande de amostra, além de necessitar de um número maior de pessoas para sua realização. Dessa forma se torna muito difícil a realização de testes piloto com amostras de furo de sonda. Na caracterização tecnológica de minério de ferro envolvendo concentração magnética, os resultados dos testes de bancada, geralmente, não são utilizados de forma direta nos projetos, pelo fato de se conhecer muito pouco sobre o *scale up* destes com os resultados de testes contínuos, o que acaba requerendo a realização de testes piloto. Utilizar correlações para prever resultados piloto a partir de resultados de bancada pode trazer ganhos aos trabalhos de caracterização envolvendo concentração magnética. Atualmente no CPT é necessária uma massa de amostra de furo de sonda de aproximadamente 80kg, para viabilizar a realização de um teste piloto de concentração magnética. Caso sejam realizados somente testes de bancada, essa massa se reduziria para 20kg, ou seja, quatro vezes menos. Essa redução significativa proporcionaria ganhos tangíveis como redução de custos (amostra de furo de sonda possui custo elevado) e redução de tempo (testes piloto, por serem mais complexos, são também mais morosos). Assim, há necessidade de estudar e buscar um melhor entendimento sobre as correlações existentes entre as escalas: bancada, piloto e industrial. Isso é de fundamental importância para os trabalhos de caracterização, principalmente no desenvolvimento de rotas de processo e estudos de variabilidade de recursos minerais que sustentam os projetos mineiros dentro de uma empresa de grande porte. A correlação entre as escalas piloto-industrial tende a ser forte, uma vez que, concentradores magnéticos piloto possuem os mesmos mecanismos de atuação de um industrial. Por outro lado, entende-se que a correlação entre as escalas bancada-piloto não seja tão direta assim, necessitando de um entendimento maior para descrevê-la.

2. OBJETIVOS

Investigar para concentradores magnéticos tipo WHIMS (*wet high intensity magnetic separator*) a correlação existente entre os resultados obtidos nas escalas de bancada, piloto e industrial.

Propor uma revisão do modelo atual utilizado pelo Centro de Pesquisas Tecnológicas da Vale para estimar recuperação mássica e qualidade de concentrado através de interpretação mineralógica voltada para concentração magnética.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Origem das propriedades magnéticas dos minerais

Segundo KLEIN & DUTROW (2007a), as propriedades físicas dos minerais são a expressão macroscópica da sua constituição interna, especialmente de sua estrutura cristalina e composição química. Os minerais podem ser separados quando submetidos a campos magnéticos de alta intensidade por apresentarem uma ampla gama de valores para a susceptibilidade magnética.

Ainda segundo KLEIN & DUTROW (2007a), os minerais denominados diamagnéticos não são atraídos por um campo magnético. Alguns minerais conhecidos como paramagnéticos podem ser atraídos por um campo magnético. Os minerais fortemente magnéticos são conhecidos como ferromagnéticos. A magnetita é um exemplo de mineral ferromagnético. Os minerais ferromagnéticos são importantes para geologia uma vez que esses minerais registram a direção do campo magnético da Terra ao longo do tempo ajudando os geofísicos a reconstruir os movimentos das placas tectônicas. Em laboratório, um pequeno ímã de mão pode ser utilizado para verificar a característica magnética dos minerais. O separador magnético isodinâmico Frantz é um instrumento de laboratório que usa campo magnético de alta intensidade para separar minerais paramagnéticos de minerais diamagnéticos e para separar minerais paramagnéticos com diferentes susceptibilidades magnéticas.

A origem das propriedades magnéticas nos minerais resulta de propriedades atômicas que são específicas para um grupo de elementos. O campo magnético é o resultado do movimento do elétron em sua órbita em torno do núcleo, sendo um fenômeno análogo ao fenômeno de geração de um campo magnético a partir da aplicação de corrente elétrica em uma bobina. O campo pode ser reforçado ou anulado pelo número quântico spin, que pode assumir os valores $+\frac{1}{2}$ ou $-\frac{1}{2}$. O spin pode ser representado por um dipolo magnético com momento magnético expresso em termos do magnéton de Bohr,

$\mu_{\beta}=9,27 \times 10^{-24} \text{Am}^2$, que é o produto da carga do elétron (em amperes, A) e a área referente ao movimento do elétron (em m^2) (KLEIN e DUTROW, 2007b).

Dessa forma, os minerais classificados como diamagnéticos são formados por átomos com figuração eletrônica similar à configuração eletrônica dos gases nobres, com elétrons emparelhados no orbital d. Os minerais classificados como paramagnéticos apresentam átomos com configuração eletrônica característica dos elementos de transição como Fe, Mn, Ti e Cr, que apresentam elétrons desemparelhados no orbital d. O momento magnético é consequência dos elétrons desemparelhados e é proporcional ao número de elétrons nessa condição. A tabela III.1 apresenta os íons mais comuns dos elementos de transição, sua configuração eletrônica e momento magnético expresso em termos do magnéton de Bohr. Os minerais classificados como ferromagnéticos, além de apresentarem os átomos característicos da família dos elementos de transição, são caracterizados por todos os dipolos magnéticos individuais apresentarem a mesma direção quando submetidos a um campo magnético. Esse fenômeno ocorre devido à sobreposição de orbitais de átomos vizinhos na rede cristalina dos minerais (KLEIN e DUTROW, 2007b).

Tabela III.1 - Íons mais comuns dos elementos de transição, sua configuração eletrônica e momento magnético expresso em termos do magnéton de Bohr (KLEIN e DUTROW, 2007b)

Íons	Configuração	Elétrons desemparelhados no orbital d	Momento magnético
$\text{Ti}^{3+}, \text{V}^{4+}$	\uparrow	1	$1\mu_{\beta}$
$\text{Ti}^{2+}, \text{V}^{3+}$	$\uparrow \uparrow$	2	$2\mu_{\beta}$
$\text{V}^{2+}, \text{Cr}^{3+}, \text{Mn}^{4+}$	$\uparrow \uparrow \uparrow$	3	$3\mu_{\beta}$
$\text{Cr}^{2+}, \text{Mn}^{3+}$	$\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow$	4	$4\mu_{\beta}$
$\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$	$\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow$	5	$5\mu_{\beta}$
$\text{Fe}^{2+}, \text{Co}^{3+}$	$\uparrow\downarrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow$	6	$6\mu_{\beta}$
Co^{2+}	$\uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow \uparrow \uparrow$	7	$7\mu_{\beta}$
Ni^{2+}	$\uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow \uparrow$	8	$8\mu_{\beta}$
Cu^{2+}	$\uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow$	9	$9\mu_{\beta}$
$\text{Zn}^{2+}, \text{Cu}^{+}$	$\uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow$	10	0

3.2. Determinação das propriedades magnéticas dos minerais

Segundo QUEIROZ e BRANDÃO (2009), o minério de ferro pode ser dividido em três grandes grupos de partículas, quanto à sua resposta frente a campos magnéticos: partículas que manifestam susceptibilidade magnética sob a presença de campos magnéticos de intensidade baixa (menor que 0,2 Tesla ou 2.000 Gauss); partículas que manifestam susceptibilidade magnética sob a presença de campos magnéticos de média intensidade (0,2 a 0,9 Tesla ou 2.000 a 9.000 Gauss); partículas que manifestam susceptibilidade magnética sob a presença de campos magnéticos de alta intensidade (maior que 0,9 Tesla ou 9.000 Gauss). Ainda segundo QUEIROZ e BRANDÃO (2009), a maneira com a qual as partículas minerais estão associadas tem influência no comportamento das mesmas frente a campos magnéticos distintos.

A propriedade física denominada susceptibilidade magnética é a expressão externa das características internas dos átomos que constituem os minerais e por sua vez explica o comportamento dos minerais quando estes são submetidos à ação de um campo magnético externo. Segundo BLUM (1997), a susceptibilidade magnética é o nível ou grau a que um determinado material ou mineral pode ser magnetizado quando submetido um campo magnético externo. A região de magnetização pode ser expressa por unidade de volume conforme a equação 3.1 e a susceptibilidade específica ou mássica de um determinado material pode ser expressa conforme a equação 3.2.

$$k = \frac{M}{H} \quad (3.1)$$

$$X = \frac{k}{\rho} \quad (3.2)$$

onde **M** é o volume magnetizado no material, **H** é a intensidade do campo magnético externo aplicado **k** é a susceptibilidade volumétrica (adimensional), **ρ** é a densidade do material e **X** é a susceptibilidade magnética específica ou mássica do material ou mineral (m³/kg).

Ainda segundo BLUM (1997), a susceptibilidade magnética medida pela maioria dos métodos é o valor aparente desta propriedade. A relação entre a susceptibilidade magnética intrínseca e a susceptibilidade extrínseca ou aparente pode ser expressa de acordo com a equação 3.3.

$$k_e = \frac{k_i}{1 + (N \times k_i)} \quad (3.3)$$

onde k_e é a susceptibilidade extrínseca ou aparente e se refere à magnetização do campo externo e que é medida pela maioria dos métodos, k_i é a susceptibilidade magnética intrínseca e se refere à magnetização do campo magnético interno do material ou mineral e N é um fator de desmagnetização que é função da forma das partículas.

A determinação das propriedades magnéticas dos minerais pode ser feita utilizando várias técnicas, como o separador isodinâmico Frantz, classificação em separadores magnéticos, magnetômetros e bobinas de ressonância. Todas essas técnicas são consideradas técnicas de laboratório (CAVANOUGH et al, 2006).

NESSET e FINCH (1980) afirmaram que a determinação da susceptibilidade magnética dos minerais é essencial para a seleção do potencial de aplicação da separação magnética, uma vez que a aplicação desta etapa unitária no processamento de minérios requer uma diferença significativa da susceptibilidade magnética entre os minerais que serão separados. Os minerais paramagnéticos podem ser classificados como paramagnéticos verdadeiros, quando suas propriedades magnéticas não variam em função da intensidade do campo magnético ao qual estão submetidos, ou podem ser classificados como antiferromagnéticos, quando suas propriedades magnéticas variam em função da intensidade do campo magnético ao qual estão submetidos. A hematita é um exemplo de mineral antiferromagnético, que teve sua susceptibilidade magnética específica determinada pelo separador isodinâmico Frantz.

Ainda segundo NESSET e FINCH (1980), no separador isodinâmico Frantz a separação ocorre em uma calha posicionada entre dois polos magnéticos que mantêm a intensidade do campo magnético constante ao longo do comprimento da calha. As forças que atuam em uma partícula quando esta está na calha do separador estão representadas na figura

3.1. F_G representa o peso da partícula e F_M representa a força exercida pelo campo magnético.

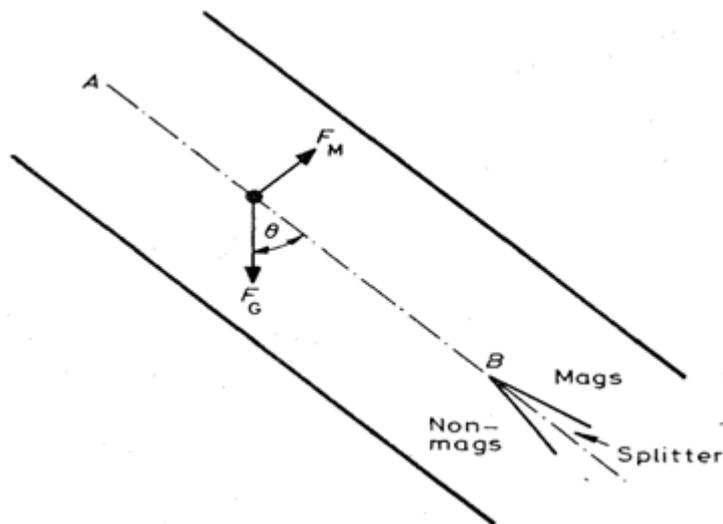


Figura 3.1: Representação das forças que atuam em uma partícula quando esta está na calha do separador isodinâmico Frantz. F_G representa o peso da partícula e F_M representa a força exercida pelo campo magnético (NESSET e FINCH, 1980).

As forças representadas na figura 3.1 podem ser definidas de acordo com as equações 3.4 e 3.5. O balanço de força pode ser representado de acordo com a equação 3.6.

$$F_G = m \times g \quad (3.4)$$

$$F_M = \frac{m}{2} \times \nabla(\sigma \times H) \quad (3.5)$$

$$-F_G \times \sin \theta = \frac{m}{2} \times \nabla(\sigma \times H) \quad (3.6)$$

onde m é a massa da partícula (g); g é a aceleração da gravidade ($9,81\text{m/s}^2$); θ é o ângulo de inclinação da calha ($^\circ$); σ é a magnetização específica do mineral (emu g^{-1}) e H é a intensidade do campo magnético ($\text{Oe} \rightarrow 100\text{Oe} = \frac{1000}{4\pi} \text{Am}^{-1}$).

Assim, os parâmetros magnéticos para os minerais classificados como paramagnéticos verdadeiros e antiferromagnéticos podem ser determinados utilizando o separador

isodinâmico Frantz e a equação 3.7 representa a correlação básica entre esses parâmetros e as variáveis do separador.

$$\sin \theta = \sigma_0 \left(\frac{1}{g} \times \frac{dH}{dx} \right) + X_\infty \left(\frac{1}{g} \times \frac{H dH}{dx} \right) \quad (3.7)$$

onde σ_0 é a magnetização específica espontânea (emu g^{-1}); X_∞ é a susceptibilidade magnética específica para a intensidade infinita do campo e o termo $\frac{H dH}{dx} = \text{constante}$, uma vez que o separador é isodinâmico e por isso a intensidade do campo não varia ao longo do comprimento da calha.

NESSET e FINCH (1980) calibraram o equipamento definindo qual o valor máximo para a intensidade do campo e a equação 3.7 foi derivada e a solução é apresentada na equação 3.8. Essa equação é válida para minerais antiferromagnéticos.

$$\sin \theta = 4,65 \sigma_0 I_{50} + 48,7 \times 10^3 X_\infty I_{50} \quad (3.8)$$

onde I_{50} é a corrente aplicada nos polos do separador isodinâmico quando 50% da massa da amostra é direcionada para o fluxo de materiais não magnéticos e o restante da massa da amostra é direcionado para o fluxo de materiais magnéticos. Considerando minerais classificados como paramagnéticos verdadeiros, $\sigma_0 = 0$ e $X = X_\infty$, a equação 3.8 pode ser escrita de acordo com a equação 3.9.

$$X = \frac{48,7 \times 10^{-6} \sin \theta}{I_{50}^2} \quad (3.9)$$

onde X é a susceptibilidade magnética específica ($\text{emu g}^{-1} \text{Oe}^{-1}$). As equações 3.8 e 3.9 permitem determinar os parâmetros magnéticos de determinadas partículas minerais a partir da leitura das variáveis do separador isodinâmico Frantz.

3.1. Separadores magnéticos de alta intensidade (WHIMS)

Nos separadores magnéticos de alta intensidade (WHIMS – *wet high intensity magnetic separator*) a separação ocorre nos pacotes magnéticos localizados na circunferência de dois rotores equipados com certo número de placas ranhuradas equidistantes umas das outras conforme apresentado na figura 3.2. As placas podem apresentar diferentes tipos de ranhuras, as configurações mais comuns são com 4, 8 e 12 ranhuras por polegada ao longo do comprimento da placa (linear). Estas configurações estão representadas na figura 3.3. A capacidade dos separadores é função do volume de polpa que pode passar pelos pacotes magnéticos, que por sua vez é função da distância entre as placas e da largura da matriz, que quanto maior, menor será a intensidade do campo magnético (WASMUTH e UNKELBACH, 1991).

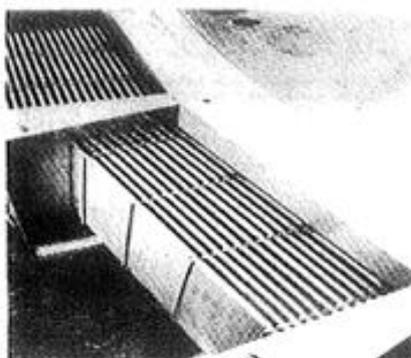


Figura 3.2: Ilustração dos pacotes magnéticos localizados na circunferência de dois rotores equipados com certo número de placas ranhuradas equidistantes umas das outras (WASMUTH e UNKELBACH, 1991).

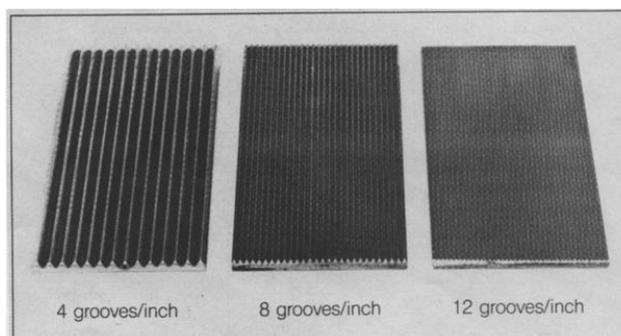


Figura 3.3: Representação das configurações mais comuns com 4, 8 e 12 ranhuras por polegada ao longo do comprimento da placa (WASMUTH e UNKELBACH, 1991).

3.2. Microscopia ótica (FAULSTICH, 2008)

Microscópio ótico é um sistema de observação ao qual são adicionados dois prismas ou placas de polarização (nicos) sendo que um fica abaixo (polarizador) e outro acima (analisador) do mineral a ser estudado. Além dos polarizadores, outros elementos podem ser adicionados no caminho ótico do microscópio permitindo a determinação de diferentes propriedades dos minerais. Dependendo de quais elementos estão sendo usados, podem ser formados sistemas óticos distintos, com objetivos diferentes. Um microscópio ótico é constituído de quatro partes básicas: sistema ótico centrado, sistema mecânico, sistema de iluminação e acessórios. Segue-se uma descrição sumarizada dos principais constituintes de um microscópio ótico.

Sistema ótico centrado

Oculares: sistema de lentes que permite conservar a imagem real do objeto fornecido pelas objetivas. Dependendo do tipo de equipamento podem oferecer aumentos de 8,5x, 10x ou 12,5x. As oculares que possuem retículos ortogonais ou milimétricos permitem um ajuste próprio do foco. Lente de Amici-Bertrand: é empregada apenas no sistema conoscópico e tem como finalidade trazer a figura de interferência para o plano focal da ocular. Acha-se localizada entre a ocular e o analisador e pode ser introduzida ou retirada do sistema ótico.

Analisador: placa de polarização que fica entre as oculares e a platina.

Objetivas: conjunto de lentes que fornece uma imagem real aumentada do objeto observado. Nos microscópios mais antigos uma única objetiva pode ser acoplada no canhão, enquanto nos modernos o revólver pode suportar de 5 a 6 objetivas. As objetivas podem ser a seco ou de imersão (se utiliza um líquido viscoso especial para mudar o índice de refração do meio).

Condensador móvel: concentra a luz sobre o objeto para uma iluminação mais intensa no caso da utilização de maiores aumentos ou na utilização do sistema conoscópico.

Diafragma de íris: dispositivo para limitar a quantidade de luz que passa pela amostra permitindo realçar as feições morfológicas dos minerais tais como borda, traços de fratura, rugosidade, inclusões, etc.

Condensador fixo: concentra a luz que vem do sistema de iluminação no objeto observado.

Filtros: placas de vidros coloridos que tem como função absorver certas radiações indesejáveis com o objetivo de aumentar o contraste e melhorar a resolução das imagens. Diversos filtros podem ser utilizados, sendo mais comum o azul para retirada da coloração amarela comumente fornecida pela lâmpada de tungstênio.

Polarizador: placa de polarização que fica entre a fonte de luz e a platina.

Sistema mecânico

Estativa ou base: corpo do microscópio.

Arco ou braço: ligação entre a base e a parte superior do microscópio e aonde é fixada a cremalheira com o conjunto de platina, sistema condensador móvel e polarizador.

Revólver ou canhão: nos equipamentos simples o canhão é onde fixamos a objetiva. O revólver é um sistema intercambiável para até seis objetivas.

Platina: placa metálica para sustentação do preparado para análise. Possui uma escala graduada e movimento de rotação para realização de medidas de ângulos de direções óticas e observação da birrefringência e pleocroísmo dos minerais.

Cremalheira macro e micrométrica: movimentação do sistema da platina na direção vertical para focalização do preparado. A movimentação é feita em dois botões acoplados, sendo que a parte externa faz a movimentação macro e, a interna, a micrométrica.

Sistema de iluminação

Luz transmitida: a luz atravessa o mineral, vindo da parte inferior do microscópio. As preparações utilizadas são lâminas delgadas ou de grãos em óleo de imersão e os minerais devem ser transparentes ou translúcidos (em geral silicatos, carbonatos, sulfatos, etc.).

Luz refletida: a luz incide no mineral, vindo da região superior do microscópio. As preparações podem ser lâminas delgadas ou seções polidas. Os minerais observados são os opacos (em geral óxidos, sulfetos, etc.).

Ambos: os microscópios mais recentes possuem os dois sistemas de iluminação já acoplados ao corpo do microscópio e em alguns casos é possível trabalhar com ambos ao mesmo tempo. Nos equipamentos mais antigos deve-se trocar o sistema de iluminação entre transmitida e refletida.

Acessórios

Estágio móvel (charriot): acessório para fixar a preparação na platina e que permite deslocá-la ortogonalmente.

Compensadores: placas de minerais montados em uma estrutura metálica com o objetivo de compensar o atraso entre os raios lento e rápido de um mineral. A utilização dos compensadores ajuda a determinar os raios lentos e rápidos dos minerais, avaliar a ordem de uma cor de interferência e determinar o sinal óptico dos minerais (na conosopia).

Placa de mica: atraso $1/4\lambda$ - utilizada principalmente em minerais com baixa cor de interferência.

Placa de quartzo ou gipsita: atraso 1λ - geralmente utilizadas em minerais com cor de interferência muito baixas a intermediárias.

Cunha de quartzo: possui espessura variável, com um atraso de $1/2\lambda$ na porção mais fina, até 3λ na porção mais espessa - utilizada em minerais com cor de interferência muito alta.

A figura 3.4 apresenta uma foto ilustrativa de um microscópio óptico petrográfico.

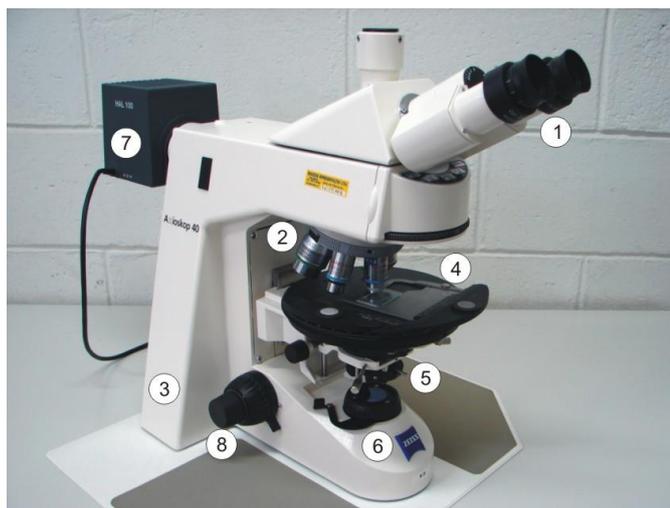


Figura 3.4 - Exemplo de microscópio ótico petrográfico (Axioskop 40 Pol da Zeiss).

1) tubo binocular; 2) revólver com objetivas; 3) base ou estativa; 4) platina com charriot; 5) sistema condensador e analisador; 6) diafragma de campo e sistema de iluminação transmitida; 7) sistema de iluminação refletida; 8) botão macro e micrométrico.

3.3. Quantificação mineralógica em microscópio ótico (*)

Na quantificação dos minerais utilizando microscópios petrográficos Leica, modelos DMLP, DM2500P e DM6000M (analisador de imagens), a seção polida a ser analisada inicialmente é posicionada de forma que pelo menos uma divisória da mesma esteja paralela a uma das escalas da platina giratória do microscópio. Tal procedimento irá garantir maior possibilidade de deslocamentos dentro da seção, condição necessária para a execução das análises mineralógicas. São três os possíveis sistemas de observação ao microscópio ótico: luz natural polarizada, sistema ortoscópico e sistema conoscópico. O microscópio, com todos os elementos introduzidos no circuito ótico constitui o sistema de observação conoscópico. Retirando-se a lente de Amici-Bertrand, a observação é feita ortoscopicamente. Quando se faz a observação microscópica sem o analisador e a lente de Amici-Bertrand tem-se a observação sob luz natural ou com nicóis paralelos (FUJIMORI e FERREIRA, 1979).

(*) Procedimento Operacional de Análise Mineralógica, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (FERREIRA, 2011).

Para identificação de minerais através das diversas propriedades observáveis ao microscópio, faz-se uso do máximo de recursos oferecidos pelo equipamento. A figura 3.5 apresenta os componentes óticos, a configuração do microscópio para os três sistemas de observação, assim como as informações obtidas quando se faz uso dos mesmos.

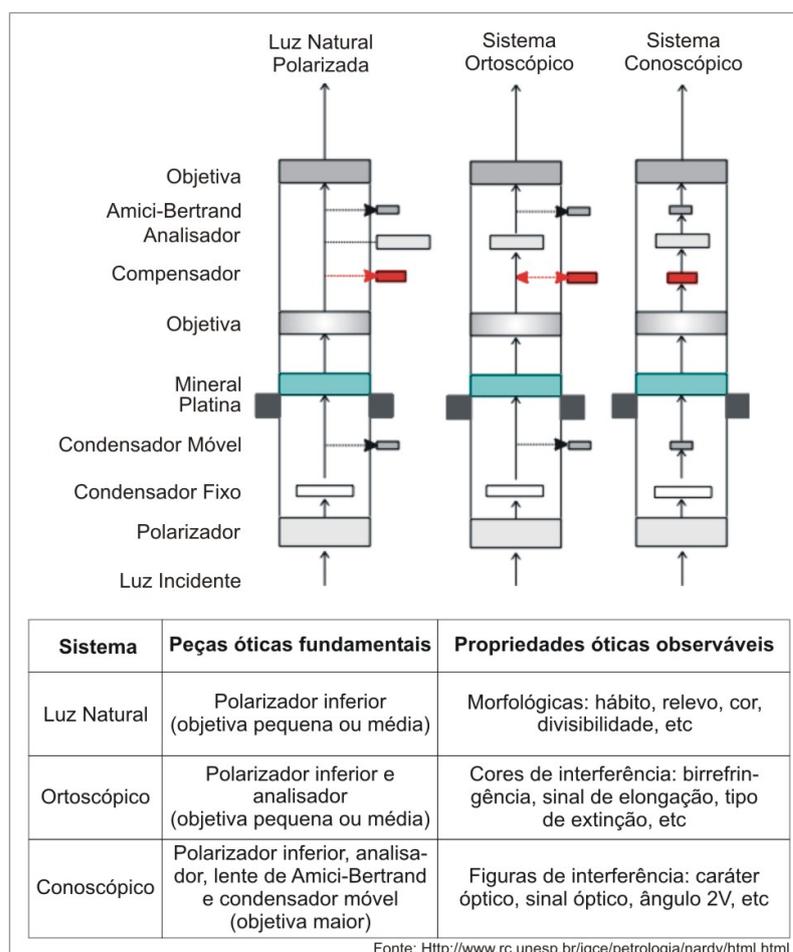


Figura 3.5 - Sistema de observação microscópica (www.rc.unesp.br/igce/petrologia)

Para identificação dos minerais via microscopia ótica de luz refletida são avaliadas propriedades essencialmente qualitativas. Avalia-se principalmente:

- **Cor:** sob luz refletida a maioria dos minerais apresenta cores que vão do branco a diversos tons de cinza sendo que apenas poucos apresentam colorações distintas como amarelo ou rosa. Propriedade subjetiva que depende do

observador e das condições de observação (uso de filtros, tipo de lâmpada aplicada, etc.).

- Reflexões internas: alguns minerais opacos e, mais comumente, translúcidos ou transparentes apresentam reflexões internas quando observados sob luz refletida. As reflexões ocorrem quando parte da luz penetra no mineral sendo refletida devido a falhas na estrutura, defeitos cristalinos, fraturas ou inclusões presentes no mineral. As reflexões internas apresentam diversas cores, o que pode ser uma característica diagnóstica do mineral (FAULSTICH, 2008).
- Dureza: propriedade avaliada indiretamente através do relevo das partículas na seção polida. Minerais com bordas salientes e relevo alto (tomando-se como base o nível da resina) indicam dureza mais alta (apresentaram maior resistência durante o polimento da seção). Já minerais com bordas fracamente visíveis e relevo baixo indicam dureza baixa. Riscos e ranhuras nos cristais são outros aspectos que auxiliam na avaliação.
- Morfologia (*habitus* e texturas típicas): o *habitus* caracteriza a forma típica dos cristais de determinada espécie mineral, resultante do arranjo atômico presente. É, portanto, característico de cada mineral (ou grupo de minerais, considerando-se possíveis alterações de composição química - pseudomorfismo). Alguns tipos de textura são também diagnósticos para identificação.

Para a quantificação das fases minerais ao microscópio ótico é utilizada uma determinada lente objetiva que permita visualização de pelo menos 20 partículas por campo visual (objetivas de 50x, 100x, 200x ou 500x), sendo analisados 25 campos. Este número visa abranger uma parcela estatisticamente representativa da seção polida analisada. Inicialmente posiciona-se o foco das lentes na interseção das divisórias de seção utilizando-se a objetiva de 50x. Ajusta-se, então, o aumento para a objetiva adequada para análise, posicionando-se o foco no primeiro campo visual (desconsideram-se as áreas de influência das divisórias de seção e das bordas da seção polida). Efetuada a quantificação, retorna-se para a objetiva de deslocamento, realizando a mudança de campo com caminhar em "zig-zag". O deslocamento é

realizado de forma que não haja coincidência de campos a serem analisados. Para quantificação utiliza-se o método de estimativa de área, ou seja, em cada campo visual são estimados os percentuais em área ocupados pelas diversas espécies minerais. Os microscópios oferecem, no campo de visualização, grades de referência para estimativa de área (figura 3.6).

Os valores de área são inseridos em planilha padrão no formato Excel, a qual efetua os cálculos de multiplicação da área ocupada pelo mineral em cada campo pela densidade do mesmo (conversão de área para massa), e o fechamento das análises na forma percentual. O percentual de participação de cada mineral é a média dos valores obtidos nos 25 campos visuais analisados. Os valores de densidade considerados são citados na listagem a seguir.

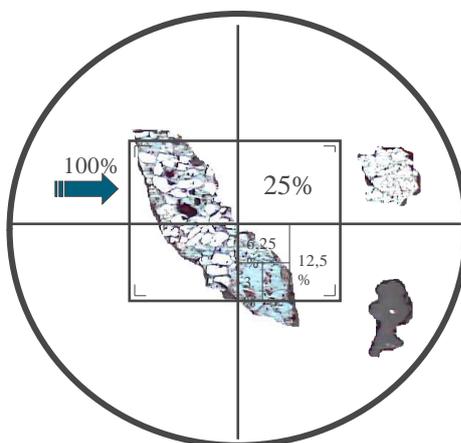


Figura 3.6 - Grade do microscópio para estimativa de área das partículas (*).

No padrão de análises mineralógicas do Centro de Pesquisas Tecnológicas da Vale (CPT) são quantificados os seguintes minerais:

Hematita (Grupo dos óxidos - óxido de ferro - Fe_2O_3): Densidade $5,26\text{g/cm}^3$ (DANA & HURLBUT, 1969). Mineral do sistema hexagonal. No microscópio ótico de luz refletida apresenta cor cinza-esbranquiçada, por vezes com tonalidade azulada, havendo possibilidade de ocorrência de reflexões internas de cor vermelha. Dureza alta e polimento bom. A hematita pode ocorrer sob diversos tipos morfológicos. A classificação utilizada no CPT subdivide o mineral da seguinte forma:

(*) Procedimento Operacional de Análise Mineralógica, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (FERREIRA, 2011).

- **Hematita Microcristalina (HMic):** típica de minérios não metamorfizados, é o primeiro óxido de ferro a se formar, sendo que sua gênese ocorre com a sedimentação química de íons em suspensão. Geralmente o metamorfismo deste mineral dá origem, inicialmente, à magnetita, que posteriormente se altera para maghemita e hematita (sinuosa, granular, lamelar ou especular), dependendo da intensidade da alteração metamórfica e das condições do meio. Apresenta cristais de granulação inferior a 0,010mm formando partículas porosas com poros muito pequenos e contatos irregulares entre os cristais, por vezes imperceptíveis devido à granulação muito fina dos mesmos. A figura 3.7 apresenta fotomicrografias de hematita microcristalina.

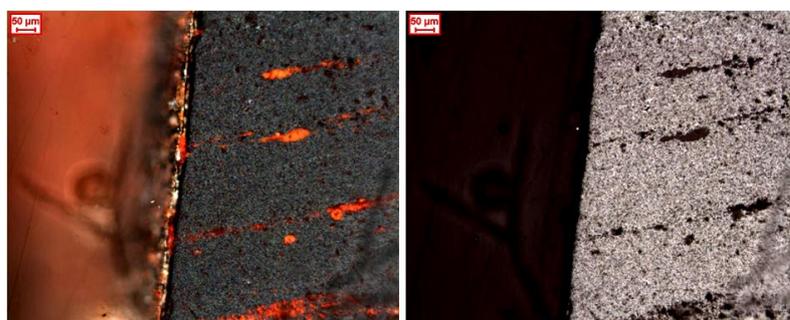


Figura 3.7 - Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida - nicóis paralelos (direita) e cruzados (esquerda). Partículas formadas por hematita microcristalina (*).

- **Hematita Especular (HE):** típica de minérios com alto grau de metamorfismo. Cristais compactos (pouco porosos), lateralmente retilíneos, com relação entre comprimento e largura maior que 5:1 (cristais inequidimensionais), conforme pode ser observado na figura 3.8.

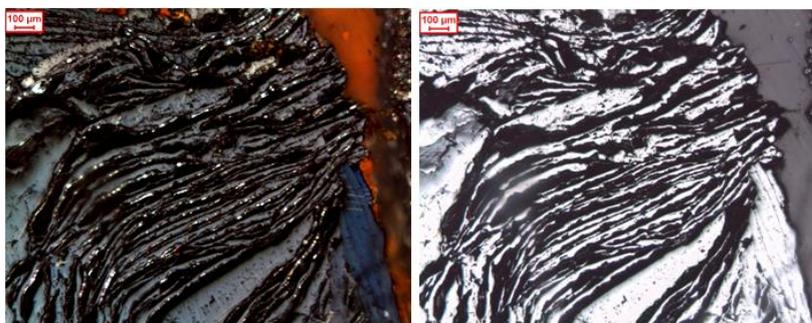


Figura 3.8 - Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida - nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Cristais de hematita especular (*).

(*) Procedimento Operacional de Análise Mineralógica, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (FERREIRA, 2011).

- **Hematita Lamelar (HL):** semelhante à hematita especular, porém os cristais apresentam relação entre comprimento e largura menor que 5:1. A figura 3.9 apresenta essa pequena diferença.

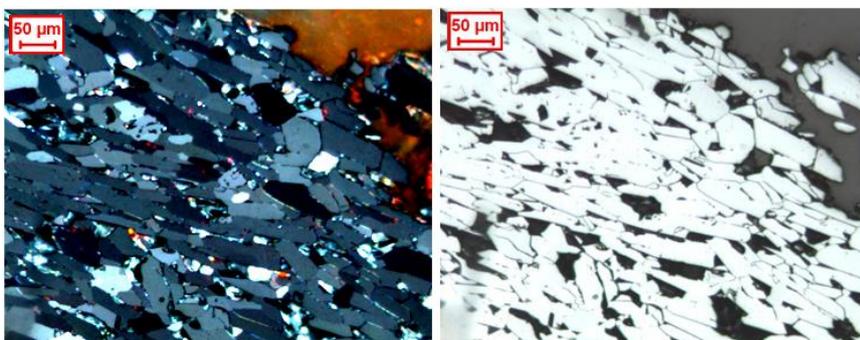


Figura 3.9 - Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida - nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Partículas contendo cristais de hematita lamelar (*).

- **Hematita Granular (HG):** cristais de aspecto granular, equidimensionais e geralmente compactos (pouco porosos). Nas partículas policristalinas, os diversos cristais de hematita granular apresentam contatos retilíneos e junções tríplices entre si. Para distinção dos cristais ao microscópio ótico é necessário aplicação de nicóis cruzados. A figura 3.10 apresenta fotomicrografias de hematita granular.

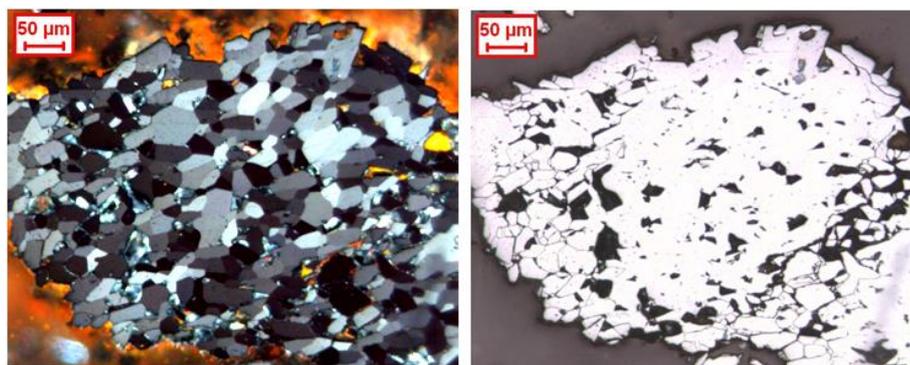


Figura 3.10 - Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida - nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Partícula contendo cristais de hematita granular (*).

(*) Procedimento Operacional de Análise Mineralógica, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (FERREIRA, 2011).

- **Hematita Sinuosa (HS):** também chamada hematita recristalizada. Apresenta cristais compactos de aspecto granular, inequidimensionais e irregulares (forma amebóide). A figura 3.11 apresenta fotomicrografias desse tipo de hematita. Nas partículas policristalinas os contatos entre os mesmos são sinuosos, imbricados, entrelaçados. Para distinção dos cristais ao microscópio ótico é necessário aplicação de nicóis cruzados.

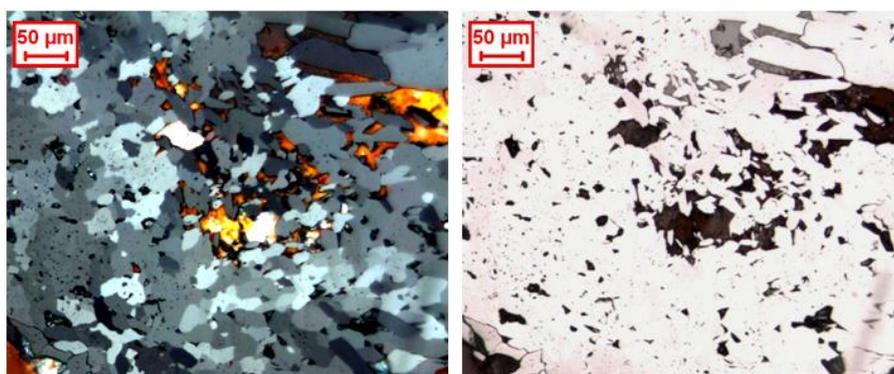


Figura 3.11 - Fotomicrografias - microscópio ótico de luz refletida - nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Partícula contendo cristais de hematita sinuosa (*).

- **Hematita Martítica (HM):** formada pela oxidação da magnetita segundo os planos cristalográficos da mesma. Apresenta microporosidade característica, e geralmente preserva relictos de magnetita. Pode apresentar estrutura em treliça, vestígios dos planos de cristalização da magnetita (observada com nicóis cruzados). Os cristais apresentam aspecto granular, e por vezes preservam o habitus da magnetita (cristais euédricos de *habitus* octaédrico). Podem ocorrer, também, de forma totalmente irregular (cristais anédricos). Nas partículas policristalinas, os contatos entre os cristais são laterais retilíneos quando o *habitus* da magnetita é preservado, ou irregulares caso o *habitus* não seja preservado. A figura 3.12 apresenta fotomicrografias de hematita martítica.

(*) Procedimento Operacional de Análise Mineralógica, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (FERREIRA, 2011).



Figura 3.12 - Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Cristais de hematita martítica (*).

Magnetita (MA - grupo dos óxidos - óxido de ferro – Fe_3O_4): Densidade $5,18\text{g/cm}^3$ (DANA & HURLBUT, 1969). Mineral do sistema cúbico. Ao microscópio ótico apresenta cor rósea a cinza-amarronzado, e não apresenta reflexões internas. Dureza alta, consequentemente apresenta bom polimento. Pode ocorrer na forma de cristais de *habitus* octaédrico, ou na forma de relictos em hematita, sendo que os cristais podem ser compactos ou porosos, com aspecto granular quando euédricos, ou às vezes totalmente irregulares, principalmente quando a porosidade é elevada. Mineral com alta susceptibilidade magnética. A figura 3.13 apresenta fotomicrografias de magnetita.

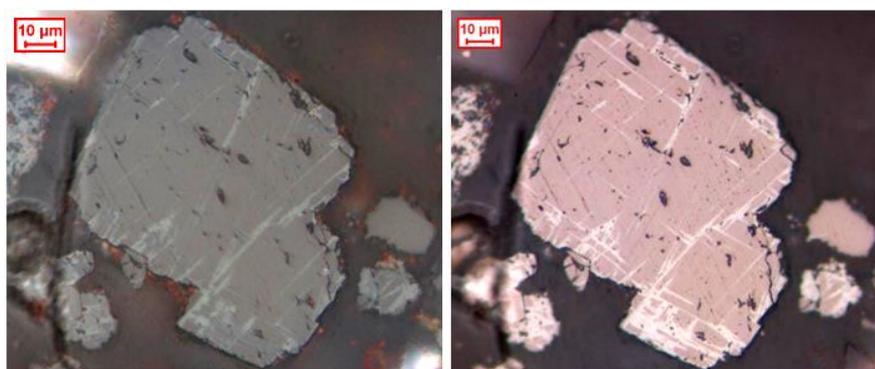


Figura 3.13 - Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Cristais de magnetita (*).

(*) Procedimento Operacional de Análise Mineralógica, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (FERREIRA, 2011).

Goethita Compacta (GO - grupo dos óxidos - hidróxido de ferro – FeO.OH):

Considera-se densidade média de 3,8g/cm³ (DANA & HURLBUT, 1969), podendo variar entre 3,3 e 4,8g/cm³, devido às variações na composição química do mineral. Ao microscópio ótico apresenta cor cinza azulada, por vezes mais escuro, havendo possibilidade de ocorrência de reflexão interna nas cores laranja, vermelho ou amarelo. *Habitus* muito variado (maciça, botrioidal, alveolar, fibrosa – anfíbolítica). Pode conter quantidades variáveis de água adsorvida, assim como outros elementos (P, Al₂O₃, SiO₂, etc). Ocorre comumente como produto de intemperismo de outros minerais de ferro. Veja exemplos de goethita compacta na figura 3.14.

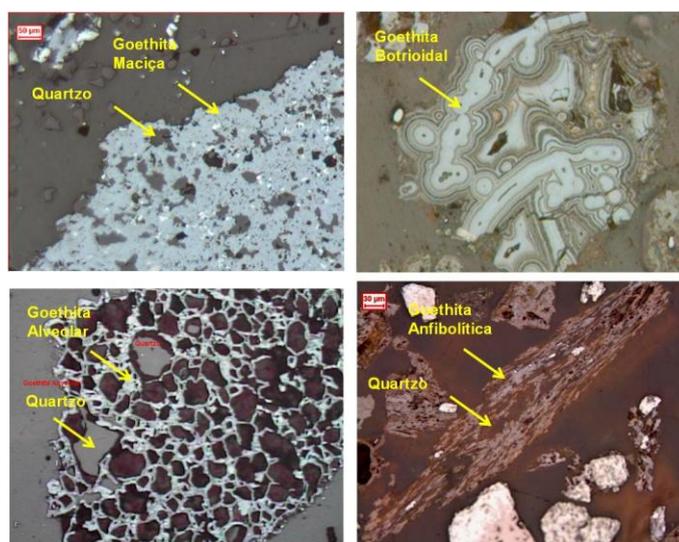


Figura 3.14 - Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicóis cruzados. Tipos morfológicos de goethita compacta (*).

Goethita Terrosa (GT - grupo dos óxidos - hidróxido de ferro - FeO.OH.nH₂O):

Considera-se densidade média de 3,6g/cm³ (DANA e HURLBUT, 1969), com intervalo entre 3,6 e 4,0g/cm³, devido às variações na composição química do mineral. Ao microscópio ótico apresenta cores variadas: marrom claro, amarelado, avermelhado, etc., e pode apresentar reflexão interna em vermelho, laranja ou amarelo. Goethita com grau de hidratação mais elevado e consistência terrosa, com granulometria muito fina (< 0,010mm), podendo ocorrer como material amorfo e/ou criptocristalino, com porosidade variável.

(*) Procedimento Operacional de Análise Mineralógica, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (FERREIRA, 2011).

Apresenta conteúdo variável de água. Comparando-se com a goethita compacta, geralmente apresenta maiores teores de contaminantes. A figura 3.15 a seguir apresenta fotomicrografias de goethita terrosa.



Figura 3.15 - Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicoóis cruzados. Partículas contendo goethita terrosa (*).

Quartzo (QM e QL - grupo dos tectossilicatos – dióxido de silício – SiO₂):

Densidade 2,65g/cm³ (DANA e HURLBUT, 1969). Mineral do sistema hexagonal. Transparente, incolor, dureza alta, bom polimento e bordas facilmente distinguíveis. Cristais geralmente compactos (pouco porosos), com contatos irregulares e bordas variando de pouco rugosa (lisa) a muito rugosa e com cavidades. Não apresenta clivagem, mas apresenta fratura conchoidal. Aspecto granular com cristais equidimensionais e inequidimensionais de granulação muito variável, conforme pode ser visto na figura 3.16. Quantifica-se o percentual de quartzo livre e o percentual de quartzo associado a minerais ferrosos (quartzo misto). O grau de liberação do quartzo na amostra pode ser calculado de acordo com a equação 3.10.

$$GL (\%) = \frac{(QL \times 100)}{(QL + QM)} \quad (3.10)$$

Onde:

GL = grau de liberação (%);

(*) Procedimento Operacional de Análise Mineralógica, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (FERREIRA, 2011).

QL = percentual de quartzo livre;

QM = percentual de quartzo misto.



Figura 3.16 - Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicóis paralelos (esquerda) e cruzados (direita). Cristais de quartzo (*).

Gibbsita (GB – grupo dos óxidos – hidróxido de alumínio - $\text{Al}(\text{OH}_3)$): Considera-se densidade média de $2,35\text{g/cm}^3$ (DANA e HURLBUT, 1969), com intervalo de densidade entre $2,30$ e $2,40\text{g/cm}^3$, devido às variações na composição química do mineral. Mineral do sistema monoclinico. Transparente, incolor a marrom pálido, de aspecto sacaróide (grãos semelhantes a açúcar), sendo necessário cruzarem-se os nicóis para distinção dos cristais. Mineral macio, e conseqüentemente apresenta polimento ruim. Porosidade não detectável ao microscópio ótico. Contatos irregulares, geralmente os cristais assumem a forma das partículas que os circundam, sendo comum ocorrer nos interstícios ou poros de outros minerais. Pode ocorrer como massa terrosa, associada à goethita terrosa e caulinita, geralmente. A figura 3.17 apresenta fotomicrografias de partículas contendo gibbsita.

(*) Procedimento Operacional de Análise Mineralógica, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (FERREIRA, 2011).



Figura 3.17 - Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicóis paralelos (esquerda) e cruzados (direita). Partículas contendo gibbsita (*).

Caulinita (CA - grupo dos filossilicatos (minerais argilosos) – silicato de alumínio hidratado – $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$): Densidade $2,60\text{g/cm}^3$ (DANA e HURLBUT, 1969) com intervalo de densidade entre $2,60$ e $2,63\text{g/cm}^3$, devido às variações na composição química do mineral. Mineral do sistema triclinico, argiloso, transparente, incolor a amarelo pálido. Apresenta aspecto terroso, não sendo possível a distinção de cristais. Macio, e conseqüentemente apresenta polimento ruim. Contatos entre cristais são irregulares, e estes geralmente assumem a forma das partículas que os circundam, sendo comum ocorrerem como massa terrosa nos interstícios ou poros de outros minerais. Granulação muito fina ($< 0,010\text{mm}$). A figura 3.18 apresenta fotomicrografias de caulinita.

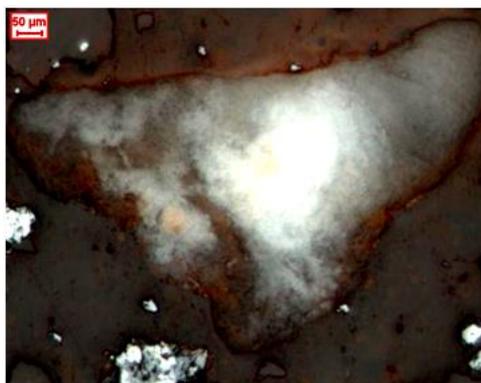


Figura 3.18 - Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicóis cruzados. Partícula de caulinita (*).

(*) Procedimento Operacional de Análise Mineralógica, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (FERREIRA, 2011).

Minerais de Manganês (MN - óxidos e hidróxidos): Considera-se densidade de $4,3\text{g/cm}^3$ (densidade da manganita, segundo DANA & HURLBUT, 1969). Abrange uma lista de diversos minerais manganésiferos, opacos ou transparentes, de cores variadas (incolor, branco, marrom, etc.). Apresentam aspecto terroso, não sendo possível a distinção de cristais, geralmente. Minerais macios, de polimento ruim, com ocorrência de microporos (criptomelana e pirolusita) a macroporos (psilomelana) em agregados terrosos. Os contatos entre cristais são irregulares, sendo que os mesmos geralmente assumem a forma das partículas que os circundam. Comum ocorrer como massa terrosa nos interstícios ou poros de outros minerais. Granulação geralmente muito fina ($< 0,010\text{mm}$). A figura 3.19 apresenta fotomicrografia de um mineral manganésífero.

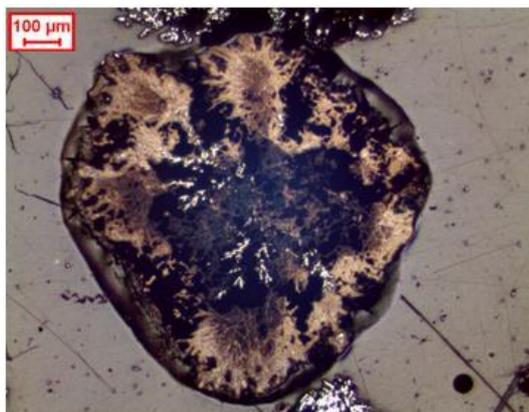


Figura 3.19 - Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicois paralelos. Minerais manganésíferos (*).

Mica (MI - minerais do grupo dos filossilicatos): neste campo são quantificados diversos minerais do grupo das micas (usualmente muscovita). Apesar de não pertencerem ao grupo das micas, são quantificados também o talco e minerais do grupo da clorita, devido ao habitus tabular e diferenciação por vezes difícil ao microscópio ótico de luz refletida. Considera-se densidade de $2,80\text{g/cm}^3$, valor que se encontra dentro dos intervalos de densidade dos principais minerais considerados. A figura 3.20 apresenta fotomicrografias de um cristal de muscovita.

(*) Procedimento Operacional de Análise Mineralógica, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (FERREIRA, 2011).

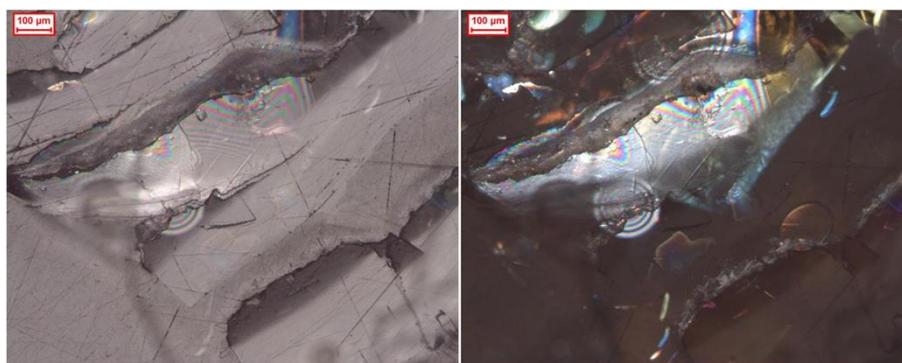


Figura 3.20 - Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida – nicóis paralelos (esquerda) e cruzados (direita). Cristal de muscovita (*).

Outros (OT): abrangem todos os minerais não listados acima. Podem ocorrer sulfetos, carbonatos, outros silicatos e óxidos, etc. A figura 3.21 apresenta alguns exemplos.

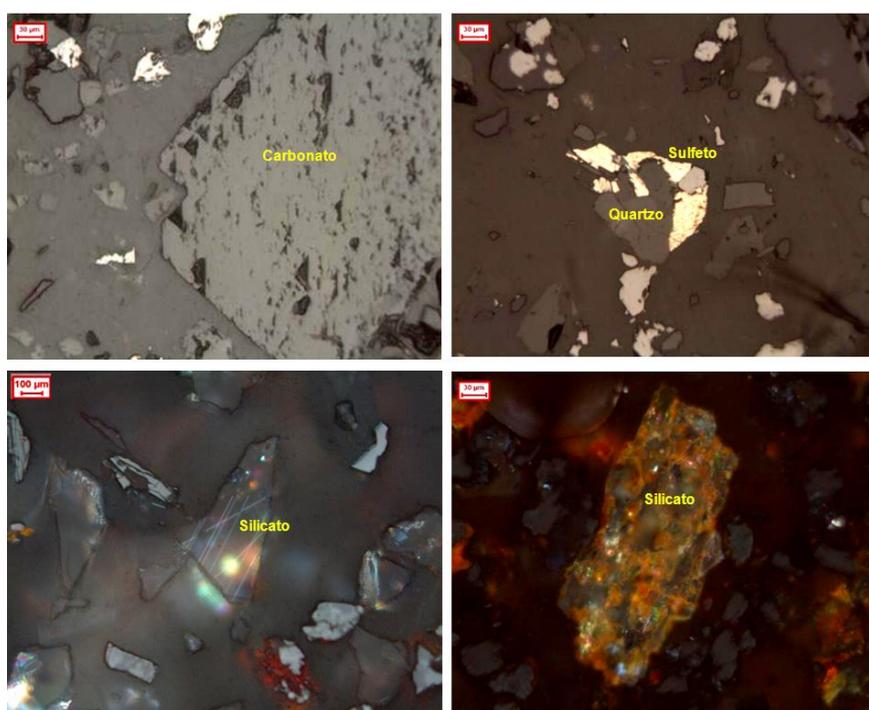


Figura 3.21 - Fotomicrografias – microscópio ótico de luz refletida. Exemplos de cristais de sulfeto, carbonato e silicato, quantificados como “Outros” (*).

(*) Procedimento Operacional de Análise Mineralógica, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (FERREIRA, 2011).

Além dos minerais acima citados, quantifica-se também a porosidade dos minerais ferrosos. Para validação das quantificações mineralógicas é efetuada comparação entre a análise química obtida em laboratório (geralmente via fluorescência de raios X) e a composição química calculada através da quantificação mineralógica. Cada espécie mineral possui uma composição química média, segundo a tabela III.2 (valores obtidos de DANA e HURLBUT, 1969):

Tabela III.2 - Composição química média dos minerais (*)

Mineral	HC - Hematitas Compactas	HM - Hematita Martítica	MA - Magnetita
Composição Química	Fe_2O_3 %Fe _{Total} - 67,75 a 69,61	Fe_2O_3 %Fe _{Total} - 67,75 a 69,61	Fe_3O_4 %Fe _{Total} - 71,68 a 72,19
Mineral	GO - Goethita	GT - Goethita Terrosa	
Composição Química	FeO.OH %Fe _{Total} - 58,02 a 62,70 %PF - 9,97 a 10,98	$\text{FeO.OH.nH}_2\text{O}$ %Fe _{Total} - 51,58 a 58,47 %PF - 12,67 a 14,17 %SiO ₂ - 2,91 a 4,8 %Al ₂ O ₃ - 0 a 6,8	
Mineral	CA - Caulinita	GB - Gibbsita	Quartzo
Composição Química	$\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ %PF - 13,47 a 13,92 %SiO ₂ - 45,48 a 46,07 %Al ₂ O ₃ - 38,07 a 39,82	$\text{Al}(\text{OH})_3$ %PF - 31,8 a 34,12 %Al ₂ O ₃ - 62,8 a 65,3	SiO_2 %SiO ₂ - 100%

Assim sendo, para o cálculo da composição química através da mineralogia utilizam-se as equações 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 e 3.15 (para as micas e os demais minerais classificados como “Outros” não se considera fórmula química devido às grandes variações composicionais. Como o percentual de ocorrência destes minerais geralmente é baixo, não há problemas com relação a fechamento).

$$\% \text{ Fe} = \frac{(\text{HE}+\text{HL}+\text{HG}+\text{HS}+\text{HM}+\text{HMIC})}{1,4297} + \frac{\text{MA}}{1,3812} + \frac{(\text{GO}+\text{GT})}{1,5892} \quad (3.11)$$

$$\% \text{ SiO}_2 = \text{QL} + \text{QM} + (\text{CA} \times 0,4600) + (\text{GT} \times 0,0386) \quad (3.12)$$

(*) Procedimento Operacional de Análise Mineralógica, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (FERREIRA, 2011).

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = (0,0680 \times \text{GT}) + (0,3820 \times \text{CA}) + (0,6530 \times \text{GB}) \quad (3.13)$$

$$\% \text{PPC} = \frac{(0,1392 \times \text{CA})}{2} + \frac{(0,3412 \times \text{GB})}{2} + \frac{(0,14517 \times \text{GO})}{2} + \frac{(\text{GO} + \text{GT} + 6,5116)}{8,891} \quad (3.14)$$

$$\% \text{Mn} = \frac{\text{MN}}{1,582} \quad (3.15)$$

Legenda:

HL: hematita lamelar; HE: hematita especular; HG: hematita granular; HS: hematita sinuosa; HMic: hematita microcristalina; HM: hematita martítica; MA: magnetita; GO: goethita; GT: goethita terrosa; CA: caulinita; GB: gibbsita; MN: óxido manganês.

3.4. Aspectos gerais sobre concentração magnética (*)

Segundo (SVOBODA, 2004), o desempenho de um separador magnético é determinado pela interação entre forças de diferentes amplitudes e intervalos. A força de domínio externo em um separador magnético é a força magnética, aplicada na separação de minerais ou remoção de partículas magnetizáveis. Essa separação depende da resposta dessas partículas à força magnética (susceptibilidade magnética) e da atuação das forças competitivas: gravitacional, hidrodinâmica, centrífuga e inercial. Uma condição necessária (mas não suficiente) para uma separação bem sucedida das partículas mais magnéticas das menos magnéticas perante um campo magnético é que a força de atração magnética deve ser maior que a soma de todas as forças competitivas (de acordo com a equação 3.16). Portanto, a seguinte condição deve ser cumprida em um separador magnético:

$$F_{\text{mag}} \geq \sum F_c \quad (3.16)$$

Onde:

F_{mag} : força magnética

F_c : forças competitivas

(*) Metodologia para Testes de Concentração Magnética, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (PAULA, 2010).

Haverá formas diferentes para objetivos diferentes. Por exemplo, para se alcançar maior recuperação de partículas magnéticas, a força de separação magnética deve ser maior que a soma das forças competitivas (vide figura 3.22). Contudo, se a força magnética for muito maior que as forças competitivas, a seletividade do processo será baixa, uma vez que, não haverá distinção entre espécies magnetizáveis de diferentes valores de susceptibilidade magnética.

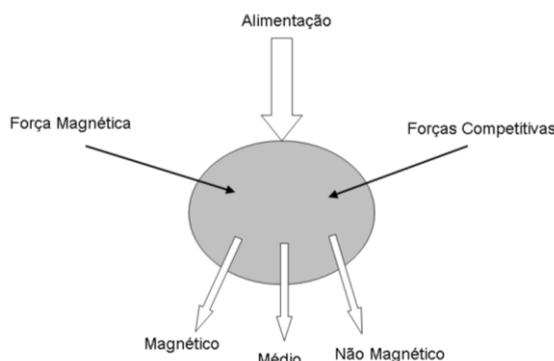


Figura 3.22 - Reprodução esquemática do processo de separação magnética (SVOBODA, 2004).

A susceptibilidade magnética é a propriedade física do mineral que determina sua resposta quando exposto a um campo magnético. De acordo com este parâmetro, os minerais podem ser classificados em três categorias (*):

Ferromagnéticos: são minerais atraídos fortemente pelo campo magnético. Além de apresentarem configuração eletrônica característica de elementos de transição como Fe, Mn, Ti e Cr, são caracterizados por todos os dipolos magnéticos individuais apresentarem a mesma direção quando submetidos a um campo magnético. Exemplo: magnetita.

Paramagnéticos: minerais atraídos fracamente por campo magnético. Apresentam configuração eletrônica característica de elementos de transição, que possuem os elétrons desemparelhados na orbital d. Exemplos: hematita e a goethita.

Diamagnéticos: minerais que não são atraídos por um campo magnético. Possuem configuração eletrônica similar aos gases nobres, com elétrons emparelhados na orbital d. Exemplos: quartzo, caulinita e gibbsita.

(*) Metodologia para Testes de Concentração Magnética, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (PAULA, 2010).

A figura 3.23 apresenta um esquema desse processo, apresentando a curva de indução magnética para diferentes espécies mineralógicas (a) ferromagnéticos, (b) paramagnéticos e (c) diamagnéticos.

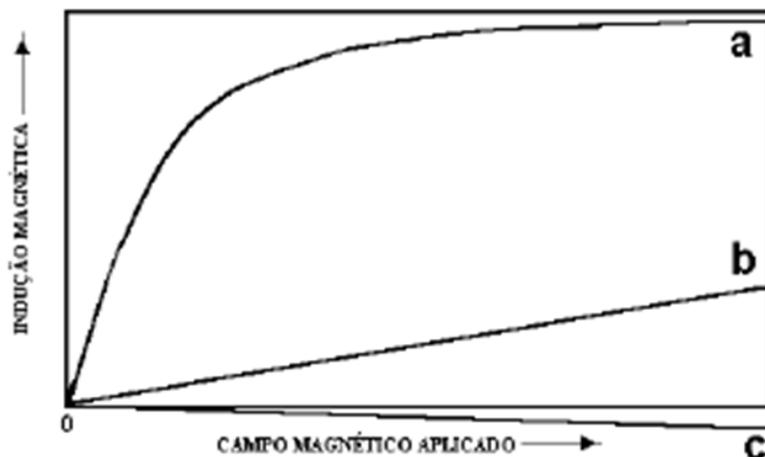


Figura 3.23 – Indução magnética para diferentes espécies mineralógicas (a) ferromagnéticos, (b) paramagnéticos e (c) diamagnéticos (SAMPAIO e LUZ, 2004).

O conceito de separação magnética é diferente de concentração magnética. A separação magnética é o processo no qual o material magnético é a parte inútil (rejeito) e o não magnético é a parte útil (concentrado). Já na concentração magnética, o material magnético é a parte útil (concentrado) e o material não magnético é a parte inútil (rejeito). Dessa forma, entende-se que o termo “concentração magnética” seria o mais adequado para identificar esse processo no tratamento do minério de ferro (*).

A estrutura mineralógica/física dos minerais influencia diretamente no processo de concentração magnética de alta intensidade de campo magnético. Os pontos mais relevantes destacados por ele são:

✓ Porosidade elevada das partículas (maior que 30% da área) exige que a água de lavagem do concentrador magnético seja aplicada com menor pressão e/ou trabalhar com um *gap* mais fechado e/ou percentual de sólidos mais elevado da polpa de alimentação a fim de garantir recuperação em massa.

(*) Treinamento de Concentração Magnética Convencional Aplicada em Minério de Ferro, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (PAULA, 2009).

- ✓ Quartzo tipicamente mais grosso que os minerais de ferro resulta num efeito negativo quanto à recuperação mássica, devido a necessidade de abertura do *gap* para evitar entupimentos por “engaiolamento”, causando ao mesmo tempo perda dos minerais de ferro de granulometria mais fina.
- ✓ Quartzo com inclusões de hematita tende a ser recuperado na concentração magnética de alta intensidade de campo. Este caso é frequente em minérios tipicamente especularíticos.
- ✓ Quartzo com rugosidade elevada tende em aderir à superfície dos minerais de ferro, podendo ser direcionado ao concentrado.
- ✓ Magnetita preservada, relictual ou associada prejudica a concentração magnética de alta intensidade. Portanto, deve-se evitar qualquer quantidade.
- ✓ Partículas menores que 0,075mm tendem a constituir o rejeito da concentração magnética convencional aplicada em minério de ferro.

As figuras 3.24, 3.25 e 3.26 (fotomicrografias registradas em microscópio ótico de luz refletida através de um analisador de imagens conectado ao software QWin LEICA) ilustram algumas das características citadas acima.



Figura 3.24 - Características de quartzo grosso, com inclusões de óxido ferroso e rugosidade elevada (*).

(*) Treinamento de Concentração Magnética Convencional Aplicada em Minério de Ferro, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (PAULA, 2009).



Figura 3.25 - Minerais com porosidade elevada: goethita com disseminação de quartzo e hematita (*).

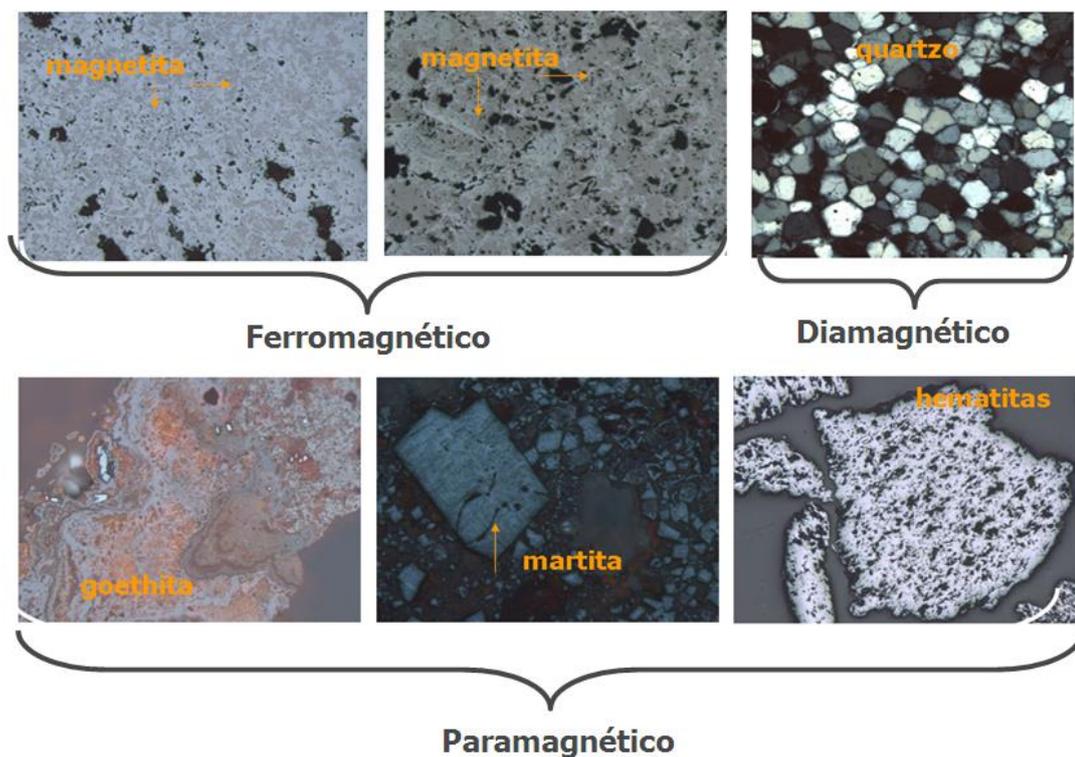


Figura 3.26 – Fotomicrografias (microscópio ótico de luz refletida): minerais ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos (*).

(*) Treinamento de Concentração Magnética Convencional Aplicada em Minério de Ferro, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (PAULA, 2009).

3.5. Concentradores magnéticos utilizados pelo Centro de Pesquisas Tecnológicas da Vale (CPT) na caracterização tecnológica de minério de ferro.

Atualmente o Centro de Pesquisas Tecnológicas utiliza para os estudos de caracterização dois modelos de concentradores magnéticos em escala de laboratório e três modelos de concentradores magnéticos em escala piloto. A seguir são apresentados descritivos de cada modelo.

Tubo Davis: concentrador eletromagnético em escala de bancada utilizado para estimar percentual de ferromagnéticos (magnetita preservada). É operado por batelada e atinge um campo magnético máximo de 500 Gauss. A figura 3.27 apresenta fotos ilustrativas do concentrador Tubo Davis.



Figura 3.27 – Concentrador eletromagnético Tubo Davis (*).

L4 (INBRAS): concentrador eletromagnético estático em escala de laboratório que possui como mecanismo físico de concentração uma matriz de separação fixa entre dois polos magnéticos induzidos. É operado por batelada e utilizado com boa eficiência na estimativa de qualidade para concentração magnética de média e alta intensidade de campo magnético. O máximo da intensidade de campo magnético depende do *gap* em utilização. Por exemplo: para *gap* de 2,5mm e 1,5mm, o campo máximo é de 9000 Gauss e 13000 Gauss, respectivamente. A figura 3.28 apresenta fotos ilustrativas do L4.

(*) Treinamento de Concentração Magnética Convencional Aplicada em Minério de Ferro, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (PAULA, 2009).



Figura 3.28 – Concentrador eletromagnético L4 (*).

WDL8 (*Wet Drum L8 INBRAS*): concentrador eletromagnético de tambor em escala piloto via úmida de baixa intensidade de campo magnético (0 a 1500 Gauss). O tanque de separação é do tipo concorrente, ou seja, a alimentação possui o mesmo sentido do tambor. O *gap* (espaço entre a superfície do tambor e o fundo da bacia no centro ortogonal) é ajustável. A figura 3.29 apresenta fotos ilustrativas do WDL8.



Figura 3.29 – Concentrador eletromagnético WDL8 (*).

WDRE (*Wet Drum Rare Earth INBRAS*): concentrador magnético de tambor em escala piloto via úmida com média intensidade de campo magnético, polos salientes e com tanque tipo concorrente, ou seja, a polpa é alimentada à uma caixa posicionada em uma das laterais do tambor, e flui no sentido da rotação do mesmo. O circuito magnético é formado pelo conjunto de ímãs permanentes de terra-raras

(*) Treinamento de Concentração Magnética Convencional Aplicada em Minério de Ferro, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (PAULA, 2009).

instalado no interior do tambor e pode ser posicionado manualmente através de um volante instalado em uma das laterais do equipamento sobre o segmento de eixo fixo. Ajusta-se o *gap* apertando ou afrouxando os parafusos de sustentação do mancal do tambor. A intensidade do campo magnético depende do ângulo do magneto e da espessura do revestimento do tambor, podendo chegar a 6000 Gauss. A figura 3.30 apresenta fotos ilustrativas do WDRE.



Figura 3.30 – Concentrador magnético WDRE (*).

Minimag (Gauftec): concentrador eletromagnético de carrossel em escala piloto, via úmido de alta intensidade de campo magnético (máximo de 18000 Gauss com *gap* de 1,5mm). As partículas magnéticas são atraídas pelo campo eletromagnético e ficam aderidas às placas de imantação (constituindo concentrado), as não magnéticas são descartadas por arraste hidráulico e pela gravidade (constituindo rejeito) e as partículas mistas são descartadas por ação entre forças competitivas (constituindo médio). A figura 3.31 apresenta fotos ilustrativas do Minimag.



Figura 3.31 – Concentrador eletromagnético Minimag (*).

(*) Treinamento de Concentração Magnética Convencional Aplicada em Minério de Ferro, Documento Interno Vale – Centro de Pesquisas Tecnológicas (PAULA, 2009).

3.6. Aplicação de concentradores eletromagnéticos WHIMS nas plantas de beneficiamento da Vale (*)

Atualmente a Vale utiliza em suas plantas de beneficiamento de minério de ferro três modelos de concentradores de alta intensidade de campo magnético (WHIMS): Jones DP-317 fabricado pela Humboldt, WHC-150-DL fabricado pela INBRÁS Magnetismo e o G-3.200 fabricado pela Gaustec. Os três modelos de equipamentos são similares diferenciando-se basicamente no método utilizado para resfriamento das bobinas e na capacidade de alimentação (t/h).

O Jones DP-317 é um dos modelos mais antigos de concentradores magnéticos de alta intensidade (WHIMS). Fabricado em Colônia na Alemanha, possui bobinas de alumínio, sistema de ventiladores de ar forçado para resfriamento, pesa aproximadamente 98 toneladas, tem capacidade de processar 80t/h de mineiro com *top size* de 1,0mm e gap (abertura da matriz de separação) de 2,5 mm. Para minérios mais grossos, obrigatoriamente deve-se aumentar a abertura do gap para evitar entupimentos da matriz de separação e conseqüentemente a capacidade do equipamento aumentará. Para minérios mais finos, deve-se diminuir a abertura do gap buscando obter maiores campos magnéticos para evitar possíveis perdas de minerais de ferro finos para o rejeito. Neste caso, a capacidade do equipamento também será maior. Considerando um gap de 2,5mm, a intensidade do campo magnético atinge um valor máximo de 9000 Gauss.

A Vale possui 28 Jones DP-317 em operação na Usina Cauê e 17 na Usina Conceição em Itabira-MG. Possui ainda 12 na Usina de Fábrica em Congonhas-MG e 1 na Usina de Córrego do Feijão em Brumadinho-MG. A figura 3.32 apresenta uma foto ilustrativa do concentrador eletromagnético Jones modelo DP-317.

(*) Avaliação dos Concentradores Magnéticos de Alta Intensidade de Campo Magnético Tipo Jones da HUMBOLDT, INBRÁS e GAUSTEC, Documento Interno Vale – Gerência de Processo de Tratamento de Minérios (SILVA, 2012).



Figura 3.32 – Concentrador Jones DP-317 (*).

O Jones WHC-150-DL é fabricado no Brasil em Diadema-SP. O material da bobina pode ser de cobre ou alumínio. Possui capacidade de processar 150t/h de minério com *top size* de 1,0mm e gap de 2,5mm. A refrigeração é realizada a óleo. Nessa condição a intensidade do campo magnético atinge um valor máximo de 14000 Gauss.

A Vale possui 26 Jones WHC-150-DL em operação na Usina Brucutu em São Gonçalo do Rio Abaixo-MG. Possui ainda 6 na Usina de Alegria em Mariana-MG e 1 na Usina Conceição em Itabira-MG. A figura 3.33 apresenta uma foto ilustrativa do concentrador eletromagnético Jones modelo WHC-150-DL.

(* Avaliação dos Concentradores Magnéticos de Alta Intensidade de Campo Magnético Tipo Jones da HUMBOLDT, INBRÁS e GAUSTEC, Documento Interno Vale – Gerência de Processo de Tratamento de Minérios (SILVA, 2012).



Figura 3.33 – Concentrador Jones WHC-150-DL (*).

O Jones G-3.200 é fabricado no Brasil em Nova Lima-MG com material da bobina de alumínio. Possui capacidade de processar 150t/h de minério com *top size* de 1,0mm e gap de 2,5mm. A refrigeração é realizada a ar natural. Nessa condição a intensidade do campo magnético atinge um valor máximo de 10000 Gauss.

A Vale possui 2 máquinas G-3.200 em operação na Usina Mutuca em Nova Lima-MG. Possui 1 máquina na Usina de Fábrica em Congonhas-MG e 1 na Usina Brucutu em São Gonçalo do Rio Abaixo-MG, ainda em fase de testes. A figura 3.34 apresenta uma foto ilustrativa do concentrador eletromagnético modelo G-3.200.

(*). Avaliação dos Concentradores Magnéticos de Alta Intensidade de Campo Magnético Tipo Jones da HUMBOLDT, INBRÁS e GAUSTEC, Documento Interno Vale – Gerência de Processo de Tratamento de Minérios (SILVA, 2012).



Figura 3.34 - Concentrador Jones modelo G-3200 (*).

3.7. Desenvolvimento de um modelo para concentradores magnéticos de alta intensidade (SCHNEIDER e CALIXTO, 2006).

Separadores magnéticos de alta intensidade tipo Jones têm aplicação importante na concentração de minérios de ferro. Esses separadores se baseiam na diferença de susceptibilidade magnética entre a hematita e o quartzo, possibilitando a separação dessas fases minerais. Partículas liberadas de hematita ou partículas que contenham grandes quantidades de hematita na sua composição podem ser defletidas pela presença de um campo magnético, enquanto as partículas de quartzo liberadas e as partículas compostas principalmente por quartzo são direcionadas para o rejeito. Essas operações devem ser contínuas para aplicação em separadores industriais. Nos separadores tipo Jones, um carrossel contendo células magnetizadas pode ser alimentado de forma contínua. Cada célula contém placas magnetizadas, por indução, aumentando tanto o

(*) Avaliação dos Concentradores Magnéticos de Alta Intensidade de Campo Magnético Tipo Jones da HUMBOLDT, INBRÁS e GAUSTEC, Documento Interno Vale – Gerência de Processo de Tratamento de Minérios (SILVA, 2012).

gradiente do campo magnético no interior da célula bem como a superfície interna da célula para coleta de partículas susceptíveis. Partículas do concentrado são literalmente aderidas a essas placas enquanto as partículas constituintes do rejeito devem fluir livremente entre as placas para fora das células. As placas não são lisas, e a presença de aletas ou reentrâncias causa um aumento do gradiente magnético, que é responsável pela força experimentada pelas partículas susceptíveis. A força magnética F que atua em uma partícula submetida a um campo magnético pode ser descrita como o produto de dois fatores, de acordo com a equação 3.16 (KING, 2001).

$$F = V_m f_m \quad (3.16)$$

onde V_m é o volume magnético da partícula, (m^3), e f_m é a densidade da força magnética, (N/m^3). O volume magnético da partícula é determinado pelas características da partícula e é específico à partícula. A densidade da força magnética é primariamente uma função da geometria do equipamento e do campo magnético gerado pelo equipamento. A densidade da força magnética é, portanto, um parâmetro específico do equipamento. O conceito de volume magnético é bastante conveniente para cálculos envolvendo partículas minerais, porque o volume magnético de uma partícula composta por mais de um mineral é a soma dos volumes magnéticos dos componentes individuais. O volume magnético de cada componente é dado pela equação 3.17:

$$V_m^i = \frac{0,5 V_i \kappa_i}{1 + N \kappa_p} = \frac{0,5 v_i V \kappa_i}{1 + N \kappa_p} \quad (3.17)$$

onde V_i é o volume do componente, que é dado pela fração em volume do componente v_i multiplicado pelo volume da partícula V , em m^3 , κ_i é a susceptibilidade magnética em volume do mineral, ou componente i , κ_p é a susceptibilidade magnética em volume da partícula, definida como a soma das susceptibilidades magnéticas em volume de cada fase, ou seja $\kappa_p = \sum v_i \kappa_i$, e N é um fator geométrico que depende da forma da partícula e, é chamado fator de desmagnetização. N vale 0,333 para partículas esféricas, 0,27 para partículas cilíndricas de comprimento igual ao seu diâmetro e 0,0172 para partículas cilíndricas de comprimento igual a dez vezes o seu diâmetro (ANDERSON, 1968).

O conceito de volume magnético pode ser facilmente aplicado em qualquer geometria ou equipamento de separação magnética, Porém, o valor da susceptibilidade magnética

de um mineral pode variar bastante. Por exemplo, a susceptibilidade magnética da hematita pode variar entre 500 e 40.000×10^{-6} . Já o quartzo é bastante invariável e sua susceptibilidade magnética varia entre -13 e -17×10^{-6} . (HUNT et. al, 1995). É, portanto, recomendável medir a susceptibilidade magnética dos minerais envolvidos com uma balança de susceptibilidade magnética, para um cálculo acurado do volume magnético de qualquer partícula, composta ou não. Se um valor médio de 20.000×10^{-6} é adotado para a hematita, assumindo-se uma partícula equidimensional ($N = 0,333$) de 0.5mm, tem-se a equação 3.18.

$$V_m^{hematita} = \frac{0,5 \times 20.000 \times 10^{-6} \times \frac{(0,5 \times 10^{-3})^3 \times \pi}{6}}{(1 + 0,333 \times 20.000 \times 10^{-6})} = 6,5 \times 10^{-13} m^3 \quad (3.18)$$

Similarmente, para uma partícula de quartzo, tem-se a equação 3.19.

$$V_m^{quartzo} = \frac{0,5 \times -15 \times 10^{-6} \times \frac{(0,5 \times 10^{-3})^3 \times \pi}{6}}{(1 + 0,333 \times -15 \times 10^{-6})} = -4,91 \times 10^{-16} m^3 \quad (3.19)$$

Assim, para uma partícula composta de hematita e quartzo, com volumes iguais de cada fase, de 1,0 mm de diâmetro, o volume magnético pode ser calculado de acordo com a equação 3.20.

$$V_m = V_m^{hematita} + V_m^{quartzo} = 6,5 \times 10^{-13} - 4,91 \times 10^{-16} \cong 6,5 \times 10^{-13} \cong V_m^{hematita} \quad (3.20)$$

Ou seja, partículas compostas tendem a se comportar como partículas de hematita pura, já que a susceptibilidade magnética em volume da hematita é muito maior, em termos absolutos, do que a do quartzo. Ainda, a força magnética atuando em partículas de hematita nessa faixa de tamanhos só é significativa para densidades de força magnética da ordem de $107 N/m^3$, resultando em uma força magnética da ordem de $10^{-6} N$, comparável à força da gravidade atuando sobre estas partículas, e permitindo sua deflexão. A densidade de força magnética pode ser definida de acordo com a equação 3.21.

$$f_m = \mu_0 \nabla H^2 \quad (N/m^3) \quad (3.21)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética do espaço livre, e vale $4\pi 10^{-7}$ (N/A²), e ∇H^2 é o gradiente do quadrado da força do campo magnético, (A²/m³), com $H^2 = H_x^2 + H_y^2 + H_z^2$. Por exemplo, a componente da densidade de força magnética na direção x pode ser calculada de acordo com a equação 3.22.

$$f_{mx} = \mu_0 \left(H_x \frac{\partial H_x}{\partial x} + H_y \frac{\partial H_x}{\partial y} + H_z \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) \quad N/m^3 \quad (3.22)$$

onde H_x é a componente da força do campo magnético na direção x , em A/m, e assim por diante. É importante desenvolver este raciocínio para demonstrar que, em casos de geometria simples, como por exemplo um separador magnético de tambor, a força magnética atuando em uma partícula pode ser calculada de forma aproximada, convertendo-se a equação 3.22 para coordenadas cilíndricas. Já para separadores magnéticos de alta intensidade, com geometrias bastante complexas, fica claro que a força do campo magnético não é a única responsável pela força atuando na partícula, mas sim o gradiente da força do campo magnético. O uso de placas com geometria um tanto complexa preenchendo as células do separador Jones provê um gradiente de magnitude suficiente para gerar forças consideravelmente maiores do que as forças gravitacionais atuando nas partículas que contêm porções significativas de hematita. Por outro lado, as forças magnéticas que atuam nas partículas de quartzo são praticamente desprezíveis, devido à baixa susceptibilidade magnética desse mineral. Para se ter uma ideia da importância do gradiente, para um campo de indução magnética de 1 Tesla (equivalente a 10.000 Gauss) a força do campo magnético fica em torno de $H=B/\mu_0=1/4\pi (10^{-7}) = 7,96 \times 10^5 A/m$. Assumindo que o gradiente na direção x não varia com y e z , e $\sigma H_x/\sigma x = 1.000,0 A/m^2$, tem-se uma densidade de força magnética equivalente a $1.000 N/m^3$. Para a partícula de hematita aqui considerada, isso resulta em uma força de $6,5 \times 10^{-10} N$, que é um valor em torno de quatro ordens de magnitude menor do que a força da gravidade atuando sobre a partícula. Colocando-se de uma maneira simples, se não fosse o alto gradiente proporcionado pelas placas no interior das células do separador Jones, a separação magnética da hematita não seria possível. Esse fato é definitivo com

respeito à técnica de modelamento a ser utilizada. Sem uma descrição estritamente acurada da geometria do campo magnético induzido no separador, é praticamente impossível calcular, com qualquer precisão, a força magnética atuando na partícula, ainda que as partículas e todas as outras condições sejam bem caracterizadas. É, portanto, necessário propor um modelo baseado nas características básicas do separador, e ajustar os parâmetros do modelo de acordo com observações práticas.

Modelo proposto e implementação

A técnica de modelamento preferencial, baseada nas forças magnéticas atuantes no processo de separação magnética, é preterida em favor de um modelo menos complexo, baseado em uma visão mais simplificada, menos fundamental, do processo de separação. Isso é necessário devido às dificuldades inerentes impostas pela configuração geométrica tri-dimensional do gradiente da força do campo magnético. Primeiramente, é necessário estabelecer um modelo de trabalho, para o separador Jones contínuo. Isso é explicado esquematicamente na figura 3.35. As etapas do processo são as seguintes:

- a) primeiramente, as partículas compostas basicamente por hematita e quartzo são alimentadas na célula. Não existe segregação por tamanho ou composição em relação às placas da célula, ou seja, uma partícula, seja qual for a sua composição e tamanho, tem uma probabilidade uniforme de estar localizada próxima à placa ou o mais longe possível da placa, ou em qualquer posição intermediária;
- b) durante a alimentação e com a célula movendo-se para fora da zona de alimentação, as partículas com susceptibilidade magnética positiva, já sob a influência do gradiente magnético, começam a se mover em direção à placa. Já as partículas de quartzo, pouco influenciadas pela presença do gradiente magnético, movem-se muito pouco ou permanecem estáticas em relação à placa, movendo-se continuamente com o fluxo de água em direção ao fundo da célula, ou rejeito;
- c) eventualmente as partículas de hematita ou que contenham quantidades significativas de hematita concentram-se perto da placa formando uma camada ou leito coeso. Partículas de quartzo dentro desta zona permanecem presas no leito coeso;
- d) as partículas que não formam o leito coeso continuam o seu caminho com o fluxo de polpa, sendo removidas no rejeito.

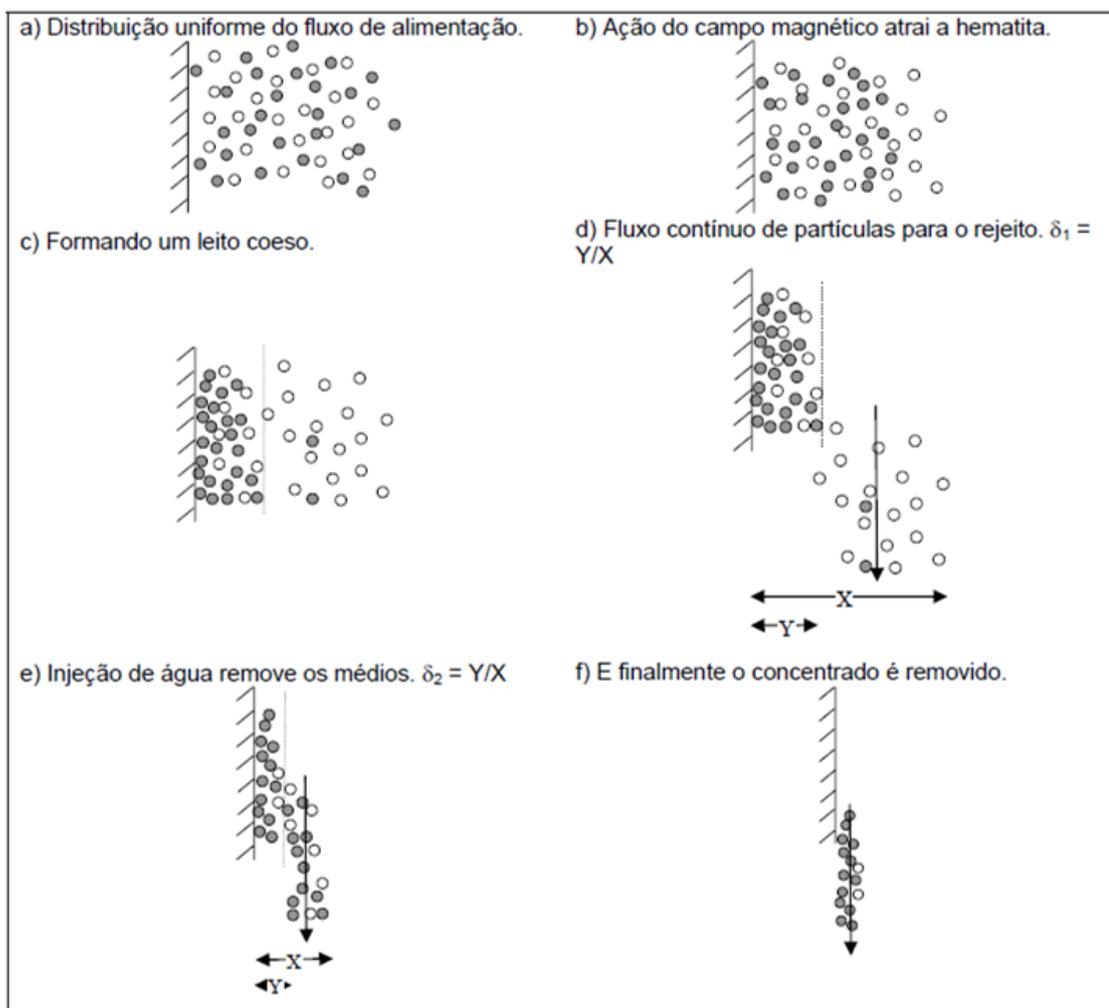


Figura 3.35 - Esquema básico de modelamento do concentrador Jones (SCHNEIDER e CALIXTO, 2006).

A espessura do leito coeso remanescente em relação à distância entre placas é um parâmetro importante do modelo porque determina onde ocorre a separação entre X rejeito e outros produtos. Este parâmetro será definido como ζ_1 , e é independente das dimensões da célula;

e) com a célula na posição de médios (*middlings*) o leito coeso é lavado com um jato de água sob alta pressão. As partículas que estão aderidas ao leito coeso podem se desprender com a força da água, e o leito coeso é dividido em uma segunda porção, definida como ζ_2 e independente de ζ_1 . Estas partículas formam os médios;

f) já com a célula na posição do concentrado, as placas são descarregadas completamente sob ação do jato de água. Dois parâmetros importantes do modelo já

foram definidos no esquema da figura 3.35, e definem as recuperações de rejeito, médio e concentrado. Resta definir o perfil de concentração do leito coeso, em função da distribuição das fases minerais na alimentação. Um modelo útil pode ser derivado considerando a energia disponível para a formação do leito que resulta da interação entre o gradiente da força do campo magnético aplicado e a susceptibilidade magnética das partículas distribuídas no interior da célula. Pode-se entender a formação do leito coeso como uma mudança de potencial quando as partículas susceptíveis mudam a sua posição dentro do leito, como mostrado na figura 3.36.

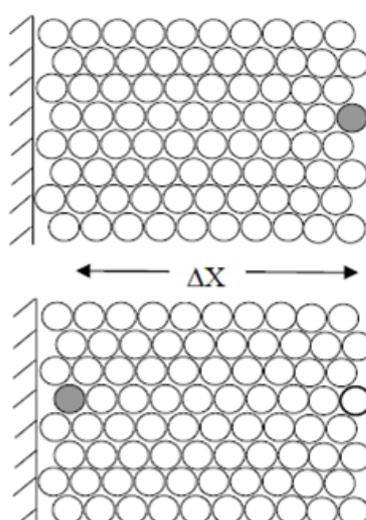


Figura 3.36 - Mudança de potencial quando uma partícula muda de posição em leito de partículas (SCHNEIDER e CALIXTO, 2006).

Esta formulação é, em vários aspectos, idêntica à formulação proposta por (KING, 2001) para processos de estratificação, com a força do campo magnético substituindo a aceleração da gravidade e os volumes magnéticos da partícula e do leito substituindo as respectivas densidades. A analogia é sem dúvida válida. A derivação do modelo é em todos os aspectos similar ao modelo de estratificação, com as substituições acima. O resultado é um modelo relativamente simples, com um único parâmetro que aqui pode ser denominado constante de estratificação magnética. Quanto maior o valor da constante, maior a organização da camada coesa, e maior será a concentração de hematita para distâncias pequenas da placa. Quanto menor o valor da constante, menos organizada será a camada e menor o teor de hematita nas imediações da placa. Com isso, a base do modelo do separador Jones está definida. A implementação do modelo

foi feita no simulador de plantas ModsimTM, com o desenvolvimento de um ícone para representar o separador tipo Jones, e posições para três fluxos de produtos, rejeito, médio e concentrado, além de um fluxo de alimentação de água de lavagem. Em princípio, o modelo é sensível aos valores de susceptibilidade magnética das fases, mas não permite que uma mesma fase tenha mais de uma susceptibilidade magnética (susceptibilidade magnética distribuída), mesmo porque isso nunca foi medido de forma apropriada para um mineral. O modelo permite a utilização de classes de teor com suscetibilidades magnéticas específicas para cada classe de teor. Ele foi testado nos circuitos de concentração magnética de grossos (fração -1,0+0,15mm) e finos (fração -0,15mm) da Usina de Conceição em Itabira-MG. Os resultados alcançados foram satisfatórios, principalmente para o circuito de finos, conforme são apresentados nas tabelas III.3 e III.4 a seguir.

Tabela III.3 – Balanço de massas: dados simulados versus medidos (SCHNEIDER e CALIXTO, 2006)

Circuito/Amostra	Alimentação Total Massa (t/h)		Alimentação Nova Massa (t/h)		Rejeito Massa (t/h)		Médio Massa (t/h)		Concentrado Massa (t/h)	
	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido
Grossos/Padrão	410,40	410,20	371,00	365,27	120,00	123,13	39,40	45,15	251,00	242,15
Finos/Padrão	623,20	623,23	-	-	174,10	174,50	-	-	449,30	448,73

Tabela III.4 – Balanço mineralógico (percentual de quartzo): dados simulados versus medido (SCHNEIDER e CALIXTO, 2006)

Circuito/Amostra	Alimentação Total Quartzo (%)		Alimentação Nova Quartzo (%)		Rejeito Quartzo (%)		Médio Quartzo (%)		Concentrado Quartzo (%)	
	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido
Grossos/Padrão	15,30	16,43	-	21,10	43,90	52,37	16,90	18,80	1,35	4,14
Finos/Padrão	26,90	27,67	-	-	80,90	82,22	-	-	5,96	6,40

4. METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado em seis etapas distintas: escolha das amostras, amostragem industrial, caracterização das amostras, interpretação mineralógica com estimativa de recuperação mássica e qualidade para o concentrado magnético, testes de concentração magnética em escala piloto/bancada e análise de correlação entre as escalas supracitadas. A figura 4.1 apresenta o fluxograma simplificado das principais atividades realizadas neste trabalho.

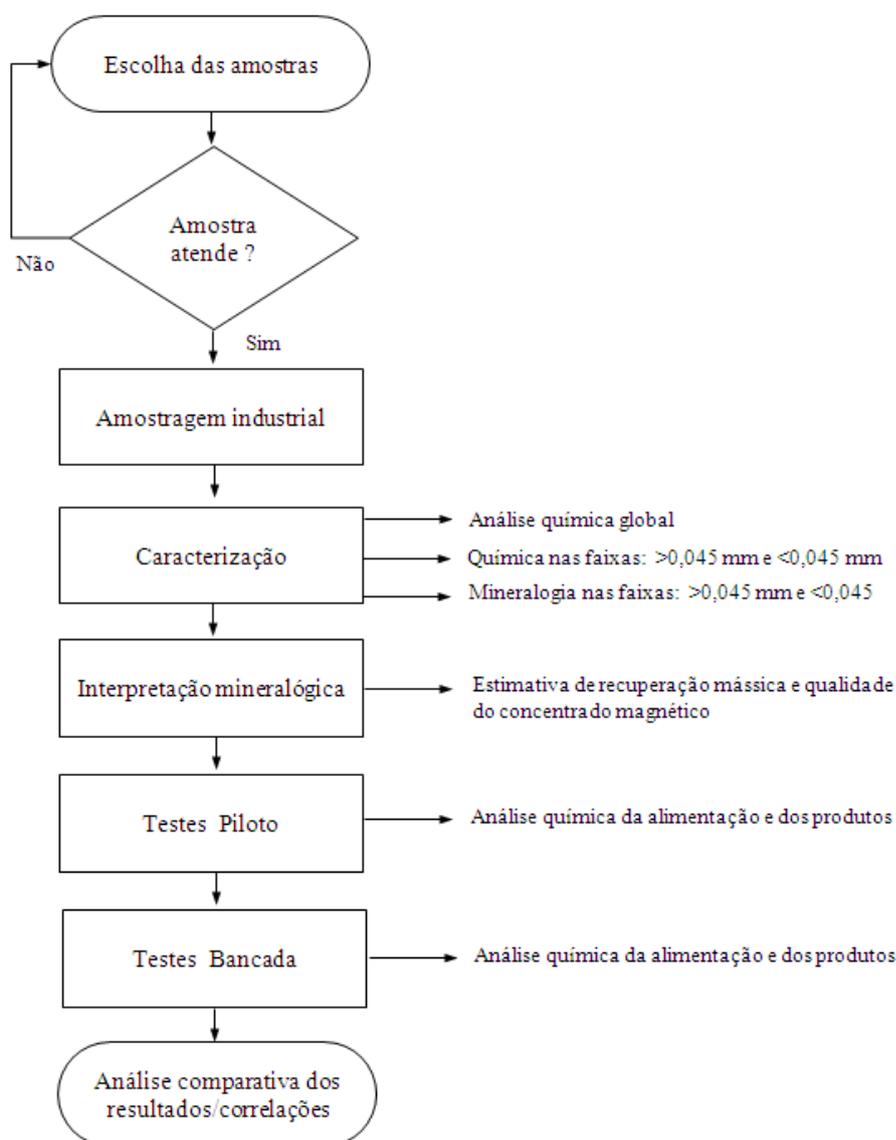


Figura 4.1 – Fluxograma simplificado da metodologia do trabalho.

4.1. Escolha das amostras

No primeiro momento foram escolhidas cinco amostras que representam alimentação do WHIMS na industrial: rejeito da flotação de Alegria, *underflow* da deslamagem de Cauê, *oversize* do peneiramento de alta frequência de Brucutu (alimentação do Jones *rougher* de Brucutu), alimentação do Jones *cleaner* de Brucutu e *underflow* do circuito de classificação da ITM-I do Pico (alimentação do Jones *rougher* do Pico).

Os critérios para escolha dessas amostras foram os seguintes:

- Característica mineralógica: amostra tipicamente especularítica (Cauê), martítica/goethítica (Alegria), especularítica/goethítica (Brucutu) e especularítica/martítica/goethítica (Pico);
- As amostras devem ser oriundas de uma planta Vale em operação;
- As amostras devem representar a alimentação do concentrador magnético de alta intensidade (WHIMS), ou seja, concentradores magnéticos de tambor e alto gradiente não fazem parte do escopo desse trabalho;
- O *top size* das amostras deve ser 1,0mm ou 0,15mm. Minérios mais finos ou mais grossos não fazem parte do escopo deste trabalho.

Visando ratificar os resultados alcançados na primeira batelada de testes, no segundo momento, foram escolhidas mais cinco amostras para realização de testes adicionais. Essas amostras já se encontravam arquivadas no CPT. Ressalta-se que essas amostras não são oriundas de plantas industriais. Portanto, para elas as análises de correlação serão realizadas somente entre as escalas de bancada e piloto.

4.2. Amostragem industrial

Para realização da amostragem industrial, primeiramente escolheu-se em cada Usina um concentrador magnético como referência, aquele que se encontrava em melhores condições de operação. Este concentrador foi inspecionado no intuito de identificar e tratar possíveis desvios, como: obstrução parcial das matrizes de separação, manômetro com defeito, contaminação entre as bandejas de médio/concentrado/rejeito, vazamento

de forma geral, desgaste da matriz de separação, entre outros. O objetivo disso foi reduzir ao máximo as imperfeições inerentes a qualquer processo industrial, aproximando-se, assim, às condições da escala piloto. A amostragem dos pontos de alimentação do concentrador WHIMS em cada Usina foi realizada manualmente durante 3 horas, com retirada de incrementos a cada 30 minutos. Durante esse período foram coletadas também amostras de concentrado, rejeito e médio (em alguns casos) para fechamento do balanço de massas da industrial, a ser utilizado como parâmetro de comparação com o balanço de massas do teste piloto.

4.3. Caracterização das amostras

As amostras das Usinas foram enviadas ao Centro de Pesquisas Tecnológicas da Vale em Itabira-MG (CPT) e foram inicialmente preparadas conforme procedimento padrão interno. Retiraram-se alíquotas representativas de cada amostra para realização de análise química e mineralógica, que foram realizadas no próprio CPT em microscopia ótica. Ressalta-se que, para a etapa de interpretação mineralógica, as amostras foram classificadas nas seguintes frações granulométricas: $>0,045\text{mm}$ e $<0,045\text{mm}$. As amostras escolhidas para testes adicionais foram submetidas somente a análise química, que foi realizada por fluorescência de raios X no laboratório químico da Vale.

4.3.1. Análise química por fluorescência de raios X

Para realização de análise química, o laboratório Vale utilizou o espectrômetro de raios X da marca Rigaku, modelo Simultix 12, aplicando-se o método da pastilha fundida, sendo analisados os seguintes elementos e compostos: Fe, SiO_2 , P, Al_2O_3 , Mn, TiO_2 , CaO e MgO. A PPC (perda por calcinação) foi determinada pelo método gravimétrico tradicional. Todas as análises seguiram rigorosamente os procedimentos padronizados do laboratório químico da Vale.

4.3.2. Análise mineralógica em microscopia ótica

A quantificação da composição mineralógica foi realizada por meio de microscopia ótica de luz refletida, sendo utilizados microscópios petrográficos Leica, modelos

DMLP, DM2500P e DM6000M. A seção polida a ser analisada, inicialmente é posicionada de forma que pelo menos uma divisória da mesma esteja paralela a uma das escalas da platina giratória do microscópio. Tal procedimento irá garantir maior possibilidade de deslocamentos dentro da seção, condição necessária para a execução das análises mineralógicas. Foram efetuadas análises qualitativas, avaliando-se as características morfológicas e texturais das partículas. Para obtenção de fotomicrografias foi empregado analisador de imagens conectado ao software QWin (LEICA).

4.4. Interpretação mineralógica

A interpretação mineralógica foi realizada segundo procedimento padrão CPT para estimar recuperação mássica e teor de SiO₂ dos concentrados magnéticos:

- Primeiramente quantifica-se por campo o percentual de partículas ferromagnéticas (são analisados 20 campos);
- Em seguida, quantifica-se o percentual de partículas de minerais portadores de SiO₂ mistos às partículas ferromagnéticas;
- Repetem-se os passos acima para as partículas paramagnéticas e diamagnéticas;
- Depois, quantifica-se as partículas com tendência a constituir concentrado e as partículas com tendência a constituir rejeito;
- Por último, calcula-se a densidade média das partículas para definição da recuperação mássica. O teor de SiO₂ no concentrado é obtido por consequência.

Atualmente, essa interpretação é realizada a partir de uma análise global da amostra. Está sendo proposto neste trabalho realizá-la de forma fracionada nas faixas: >0,045mm e <0,045mm. Isto porque, o autor defende que concentradores magnéticos convencionais perdem eficiência na separação de partículas menores que 0,045mm. Dessa forma, espera-se melhorar a assertividade do modelo atualmente utilizado no CPT para estimar recuperação mássica e teor de SiO₂ dos concentrados magnéticos. O objetivo é comparar as duas formas correlacionando as estimativas mineralógicas com os resultados dos ensaios de bancada. Ressalta-se que a interpretação mineralógica busca atingir o resultado ótimo de cada amostra, estimando, portanto a maior recuperação mássica possível para um menor teor de SiO₂ possível. Não se espera

atingir os mesmos valores dos testes de bancada/piloto, mas sim, espera-se que os valores estimados tenham correlações fortes com os resultados desses testes.

4.5. Testes em escala piloto e bancada

Todos os testes foram realizados segundo procedimentos operacionais do Centro de Pesquisas Tecnológicas da Vale. Os testes piloto foram realizados no concentrador eletromagnético Minimag e os testes de bancada no concentrador eletromagnético L4. Ressalta-se que todos os testes foram realizados em um único estágio de concentração.

4.5.1. Testes em escala piloto

Os testes piloto realizados no concentrador eletromagnético Minimag seguiram o seguinte procedimento:

- Aciona-se o campo magnético ajustando-o para o valor definido, aguardando-se 20 minutos para estabilização. Prepara-se a polpa de minério num tanque agitador de 180 litros com percentual de sólidos definido para o teste. O percentual de sólidos da polpa preparada é checado utilizando um dinamômetro. Após preparação e verificação da polpa de alimentação, ajusta-se a vazão de acordo com a taxa horária (kg/h) definida para o teste, calculando-se o tempo em segundos para encher um litro de polpa (vide equação abaixo). Utiliza-se para isso, um recipiente padrão de um litro.

$$T = \frac{3600}{\frac{W}{Cw \times Dp}} \quad (4.1)$$

Onde:

T: tempo para encher um litro

W: taxa horária em kg/h

Cw: percentual de sólidos em peso

Dp: densidade de polpa em g/cm³

- Aciona-se, então, o rotor do equipamento e ajusta-se a pressão da água de lavagem do médio e concentrado conforme valores adotados para o teste. Em seguida, alimenta-se o equipamento, aguardando cinco voltas completas do rotor para estabilização do circuito. Então, faz-se a amostragem dos fluxos de concentrado, médio e rejeito. Por último, amostra-se o fluxo de alimentação.

A tabela IV.1 apresenta os parâmetros dos testes realizados com cada amostra. Ressalta-se que buscou-se trabalhar na piloto nas mesmas condições da industrial, com exceção da taxa horária (t/h) de alimentação. Neste caso foi utilizada a capacidade máxima determinada para cada *gap* pelo fornecedor do equipamento: aproximadamente 450kg/h para *gap* de 2,5mm, 250kg/h para *gap* de 1,5mm e 600kg/h para *gap* de 3,8mm. Segundo o autor, resultados obtidos em testes piloto realizados no concentrador eletromagnético *Minimag* podem ser utilizados num projeto de forma direta, sem aplicação de nenhum fator de escala. Isso porque o *Minimag* possui os mesmos mecanismos de atuação do concentrador eletromagnético industrial. Este trabalho visa ratificar isso, através de análise comparativa dos resultados obtidos na piloto com os obtidos na industrial.

Tabela IV.1 - Parâmetros para os testes piloto de concentração magnética

Amostra	Campo Magnético (Gauss)	<i>gap</i> (mm)	Rotação do Rotor (RPM)	Pressão Água Concentrado (kgf/cm ²)	Pressão Água Médio (kgf/cm ²)	Altura da caixa de alimentação (m)	Taxa de alimentação (kg/h)
Cauê	9000	2,5	4,0	5,0	NA	2,0	470
Alegria	13000	1,5	4,0	5,0	NA	1,0	260
Brucutu Rougher	12600	2,5	5,0	2,0	2,0	3,0	450
Brucutu Cleaner	9000	2,5	5,0	2,0	2,0	3,0	450
ITM-I do Pico	12000	3,8	5,0	5,0	NA	3,0	600

4.2.1. Testes em escala de bancada

Os testes de bancada realizados no concentrador eletromagnético L4 seguiram o seguinte procedimento:

Inicialmente é inserido no equipamento o *canister* com a matriz/malha desejada. Aciona-se, então, o campo magnético aguardando 20 minutos para estabilização. Decorrido este tempo, ajusta-se a intensidade do campo magnético variando a intensidade de corrente elétrica, sendo o campo aferido mediante uso de *gaussmeter*. Posiciona-se um recipiente para coletar o rejeito abaixo do funil de descarga do concentrador. Alimenta-se gradativamente o equipamento espalhando-se aproximadamente 20g de amostra na parede do funil. Logo em seguida borrifa-se água controlada para promover o escoamento das partículas não/menos magnéticas para o balde de rejeito. Retira-se o balde de rejeito colocando no lugar o balde de concentrado. Desliga-se o campo magnético para descarga do concentrado borrifando água suficiente para a limpeza das matrizes. Os mesmos passos são repetidos até que se ensaie toda a amostra, que pode variar de 100g a 500g. Para este trabalho em específico, utilizou-se uma massa de 100kg em todos os testes.

A tabela IV.2 apresenta os parâmetros aplicados na primeira batelada de ensaios. Ressalta-se que o concentrador eletromagnético de bancada (L4) opera por batelada e não possui todos os mecanismos de atuação do equipamento piloto. Foram definidos os seguintes parâmetros para realização dos ensaios: intensidade do campo magnético e vazão da água de lavagem. Os testes referentes a cada amostra foram realizados com o mesmo *gap* da piloto/industrial. Em função da elevada eficiência de separação, comumente apresentadas pelos equipamentos de bancada, espera-se que os resultados obtidos na piloto sejam reproduzidos em situações de campos magnéticos mais elevados e, em alguns casos, talvez essa reprodução não seja possível. Porém, espera-se que estes resultados apresentem algum tipo de tendência, para que seja possível estabelecer uma correlação entre as escalas bancada e piloto. Ressalta-se que, para as amostras onde os campos magnéticos aplicados na piloto/industrial foram maiores que 9000 Gauss, realizou-se um teste adicional com água de lavagem de 50mL/seg, aplicando-se o mesmo valor de campo magnético da piloto/industrial.

Tabela IV.2 - Parâmetros para os testes de concentração magnética de bancada

Teste	Campo Magnético (Gauss)	Vazão da Água Lavagem (mL/seg)	Teste	Campo Magnético (Gauss)	Vazão da Água Lavagem (mL/seg)
1	2000	50	13	6000	100
2	3000	50	14	7000	100
3	4000	50	15	8000	100
4	5000	50	16	9000	100
5	6000	50	17	2000	150
6	7000	50	18	3000	150
7	8000	50	19	4000	150
8	9000	50	20	5000	150
9	2000	100	21	6000	150
10	3000	100	22	7000	150
11	4000	100	23	8000	150
12	5000	100	24	9000	150

Após a conclusão da primeira batelada de ensaios, realizou-se análise de correlação entre os resultados de bancada e piloto. Visando ratificar esses resultados, selecionou-se mais cinco amostras para realização de testes adicionais, que foram realizados nas escalas de bancada e piloto. Essas amostras são oriundas da barragem de rejeito da Mina de Fábrica, localizada no município de Congonhas-MG. Utilizou-se as equações obtidas nos gráficos de correlação da primeira batelada de ensaios para estimar os resultados da piloto através dos resultados de bancada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise química

A tabela V.1 apresenta os resultados da análise química global e a das faixas >0,045mm e <0,045mm para as amostras da primeira batelada de testes. Ressalta-se que os resultados da segunda batelada serão apresentados juntamente com aqueles dos testes. Analisando as amostras de forma global, verifica-se que a amostra mais hidratada (medida pelo teor de PPC) é a “alimentação do Jones do Pico”, apresentando PPC na ordem de 1,72%. Segundo (QUEIROZ, 2005) amostras com maior nível de hidratação tendem a apresentar maiores teores de Fe no rejeito em processo de concentração magnética de alta intensidade. Em relação à análise química fracionada, nota-se que todas as amostras apresentam a faixa granulométrica <0,045 mm mais rica (maiores teores de Fe), o que de certa forma era de esperar, uma vez que a maioria dos minérios tendem a apresentar as frações finas mais ricas. A granulometria muito fina de uma amostra associada ao elevado teor de Fe nessa fração fina tende a contribuir para a elevação do teor de Fe nos rejeitos de concentração magnética. De maneira geral, todas as amostras apresentam baixa participação de substâncias deletérias (exceto SiO₂) em suas composições químicas, com exceção da amostra de “alimentação do Jones de Alegria”, que apresenta significativa participação de MgO.

Tabela V.1 – Análise química das amostras

Amostra	Fração (mm)	% Massa	Química (%)								
			Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
Alimentação Jones Alegria	+ 0,045	80,99	2,47	96,70	0,010	0,30	0,001	0,001	0,012	0,134	0,24
	-0,045	19,01	35,22	46,78	0,027	1,95	0,016	0,001	0,001	0,148	1,07
	Global Calculada	100,00	8,70	87,21	0,013	0,61	0,004	0,001	0,010	0,137	0,40
	Global Analisada	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
Alimentação Jones Finos Cauê	+ 0,045	78,76	34,23	50,24	0,015	0,29	0,048	0,026	0,001	0,001	0,36
	-0,045	21,24	63,81	6,56	0,032	0,83	0,102	0,067	0,001	0,001	0,61
	Global Calculada	100,00	40,51	40,96	0,019	0,40	0,059	0,035	0,001	0,001	0,41
	Global Analisada	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
Alimentação Jones Rougher Brucutu	+ 0,045	96,74	56,02	18,97	0,011	0,33	0,015	0,035	0,012	0,022	0,75
	-0,045	3,36	67,22	2,70	0,016	0,44	0,029	0,082	0,019	0,019	1,11
	Global Calculada	100,00	56,45	18,44	0,011	0,33	0,015	0,037	0,012	0,022	0,76
	Global Analisada	100,00	56,00	18,02	0,011	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
Alimentação Jones Cleaner Brucutu	+ 0,045	96,54	60,75	11,52	0,018	0,36	0,019	0,055	0,010	0,021	0,96
	-0,045	3,46	66,94	2,59	0,030	0,92	0,042	0,021	0,001	0,001	1,61
	Global Calculada	100,00	60,96	11,21	0,018	0,38	0,020	0,054	0,010	0,020	0,98
	Global Analisada	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
Alimentação Jones Rougher Pico	+ 0,045	85,44	56,37	15,66	0,053	0,80	0,273	0,008	0,001	0,001	1,70
	-0,045	14,56	62,92	7,30	0,040	1,11	0,087	0,018	0,001	0,001	1,48
	Global Calculada	100,00	57,32	14,44	0,051	0,85	0,246	0,009	0,001	0,001	1,67
	Global Analisada	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72

5.2. Análise mineralógica

A tabela V.2 e figura 5.1 apresentam os resultados da análise mineralógica medida na fração global das amostras estudadas na primeira batelada de testes. As amostras da segunda batelada de testes não foram submetidas a análise mineralógica. Todas as amostras apresentam a hematita como principal mineral de Fe, variando somente em relação à trama, forma e textura, com predominância das hematitas compactas (HE: hematita especular, HL: hematita lamelar, HG: hematita granular e HS: hematita sinuosa). A participação de magnetita é pequena em todas as amostras, o que já se esperava, uma vez que essas amostras representam alimentação de concentradores magnéticos de alta intensidade, que não possuem margem de tolerância para valores significativos de magnetita. De maneira geral, o principal mineral de ganga é o quartzo, que se apresenta significativamente misto na amostra do Pico (4,23%), valor que tende a representar o percentual mínimo de SiO_2 no concentrado magnético. Amostras com maiores quantidades de goethitas (GO: compacta e GT: terrosa), tendem em apresentar maiores teores de Fe no rejeito da concentração magnética.

A figura 5.2 apresenta fotomicrografias ilustrativas das características mineralógicas citadas acima. Com exceção da amostra do Pico, que tende a apresentar concentrados com maiores teores de SiO_2 e rejeitos com maiores teores de Fe, as demais amostras não possuem restrições mineralógicas em relação ao processo de concentração magnética. Assim, entende-se que para essas amostras é possível obter concentrados com baixos teores de SiO_2 e rejeitos com baixos teores de Fe.

Tabela V.2 – Quantificação mineralógica estimada em massa

Amostras	Quantificação Mineralógica Estimada em Massa													
	HE	HL	HG	HS	HM	MA	GO	GT	QL	QM	MN	CA	GB	OT
Alegria	0,32	2,47	7,38	0,00	0,26	0,00	0,24	2,87	85,44	0,94	0,00	0,03	0,00	0,05
Cauê	9,27	23,02	22,29	0,04	0,46	0,16	0,67	0,73	42,22	0,01	0,04	0,91	0,13	0,06
Brucutu Rougher	16,34	36,70	17,53	0,13	1,13	0,03	7,24	0,42	19,08	0,55	0,00	0,21	0,64	0,00
Brucutu Cleaner	16,61	46,13	15,06	1,60	0,87	0,13	7,12	0,98	9,88	0,34	0,00	0,04	1,25	0,00
Pico	0,07	5,47	17,32	43,64	6,36	1,80	7,11	0,49	10,47	4,23	1,37	0,51	1,06	0,11

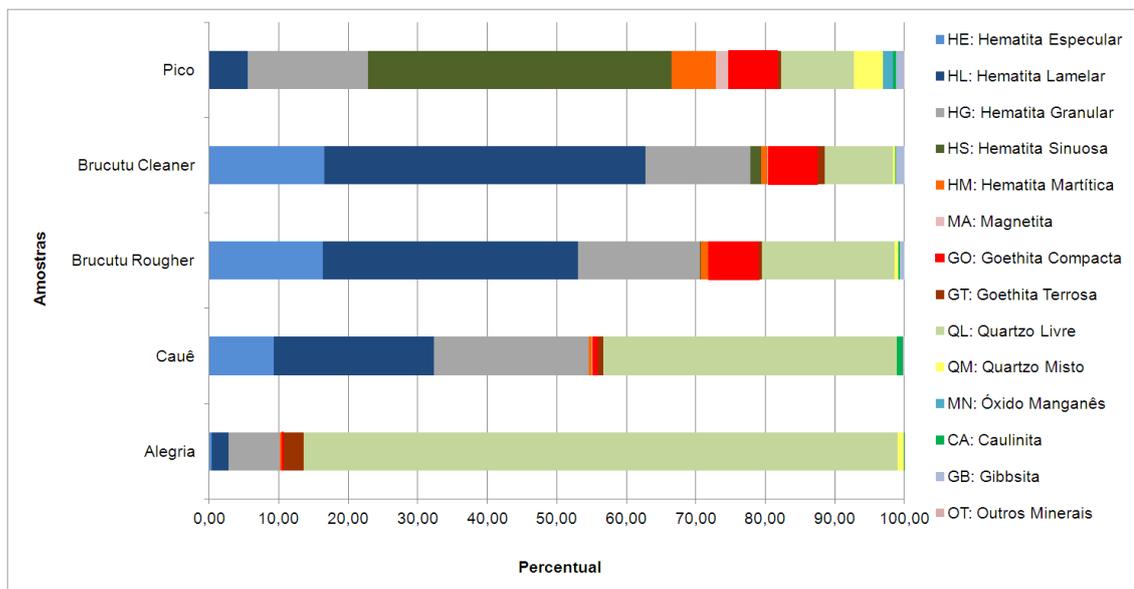


Figura 5.1 – Quantificação mineralógica estimada em massa.

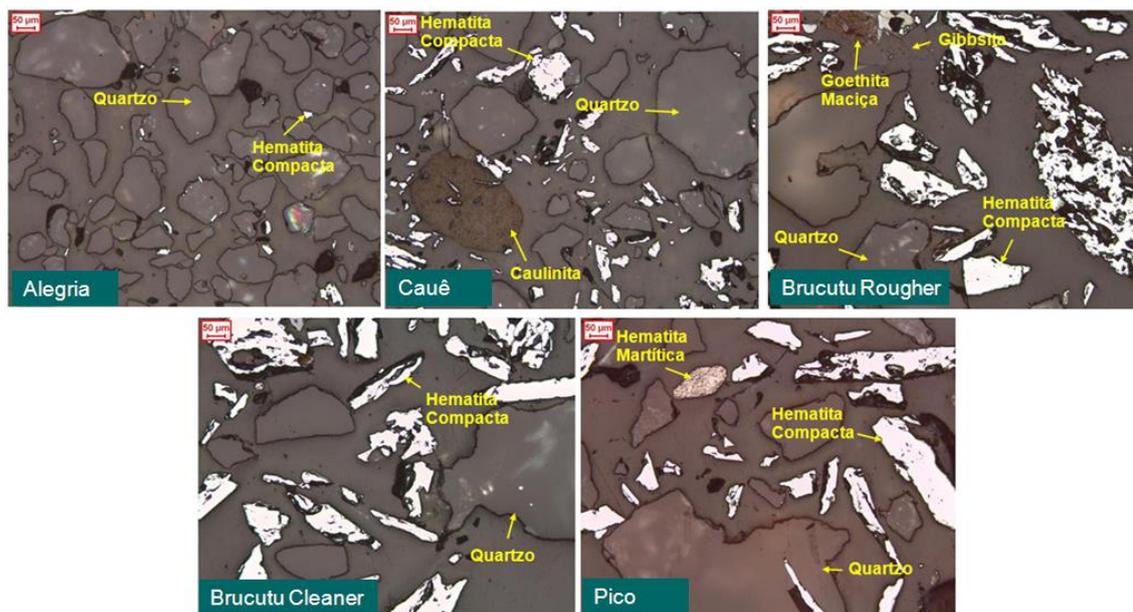


Figura 5.2 – Fotomicrografias da fração global das amostras.

5.3. Interpretação mineralógica

Na interpretação mineralógica foram considerados três pontos: quantificação mineralógica, química global e química nas faixas >0,045mm e <0,045mm. O objetivo disso é verificar a possibilidade de melhorar o modelo atualmente utilizado pelo CPT na estimativa de recuperação mássica e teor de SiO₂ para concentrado de concentração magnética. Atualmente essa interpretação é realizada com base na análise da fração global. Este trabalho está propondo realizar tal análise com base na amostra fracionada (faixas >0,045mm e <0,045mm). Como já citado no item 4.2.1, não se espera atingir na estimativa mineralógica os mesmos valores dos testes de bancada/piloto, mas sim, espera-se que os valores estimados tenham correlações fortes com os resultados desses testes.

A tabela V.3 apresenta os valores da recuperação mássica e teor de SiO₂ estimados para concentrado magnético. Comparando a global analisada com a global calculada pelas faixas >0,045mm e <0,045mm, verifica-se que esta última tende em estimar menores valores para teor de SiO₂ no concentrado. Outro ponto que se apresenta também discrepante é o percentual de ferromagnético: 0,38% na global analisada versus 2,72% na global calculada.

Tabela V.3 – Estimativa mineralógica de recuperação mássica e teor de SiO₂ para concentrado

Amostra	Fração (mm)	% Massa	Estimativa Mineralógica para Concentração Magnética				
			% Ferromagnético	% Paramagnético	% Diamagnético	Recuperação Mássica (%)	% SiO ₂ no Concentrado
Alimentação Jones Alegria	+ 0,045	80,99	0,04	2,30	97,60	2,34	0,23
	-0,045	19,01	0,10	60,12	39,00	60,23	0,76
	Global calculada	100,00	0,06	13,29	86,46	7,24	6,88
	Global Analisada	-	0,00	11,04	88,96	8,75	19,35
Alimentação Finos de Cauê	+ 0,045	78,76	0,53	28,02	70,98	28,55	1,33
	-0,045	21,24	0,00	87,58	11,56	87,58	0,43
	Global Calculada	100,00	0,42	40,67	58,36	41,08	1,14
	Global Analisada	-	0,99	36,33	61,94	37,32	3,01
Alimentação Jones Brucutu Rougher	+ 0,045	96,61	0,00	77,66	19,05	77,66	2,17
	-0,045	3,39	0,38	81,60	8,14	81,98	0,30
	Global Calculada	100,00	0,01	77,79	18,68	77,80	2,11
	Global Analisada	-	0,18	78,33	17,50	78,51	5,47
Alimentação Jones Brucutu Cleaner	+ 0,045	96,54	0,00	87,38	9,13	87,38	1,89
	-0,045	3,46	0,00	89,34	4,28	89,34	0,07
	Global Calculada	100,00	0,00	87,44	8,97	87,44	1,83
	Global Analisada	-	0,60	83,44	11,67	84,04	4,33
Alimentação Jones Pico Rougher	+ 0,045	85,44	0,45	62,06	32,96	62,51	4,60
	-0,045	14,56	0,00	86,78	11,79	86,78	0,58
	Global Calculada	100,00	0,38	65,66	29,88	66,04	4,02
	Global Analisada	-	2,72	74,72	18,22	77,43	7,68

As figuras 5.3 e 5.4 apresentam os gráficos de correlação da estimativa mineralógica com os resultados obtidos nos testes de bancada propriamente ditos, sendo que na figura 5.4 os valores estimados são referentes às análises com as amostras fracionadas nas faixas >0,045mm e <0,045mm. Entende-se que o espaço amostral é pequeno, uma vez que a base de dados possui somente cinco amostras. De qualquer forma, percebe-se que as correlações encontradas são boas, o que indica que a interpretação mineralógica se apresenta como uma boa ferramenta a ser utilizada nos trabalhos de caracterização tecnológica, uma vez que consegue prever para o processo de concentração magnética o potencial de concentrabilidade de uma determinada amostra. Isso tende a proporcionar benefício como: a redução do número de testes de bancada a serem realizados e o tempo de caracterização gasto em um determinado estudo. Verifica-se ainda que a condição de amostra global apresenta correlações mais fortes que a amostra fracionada.

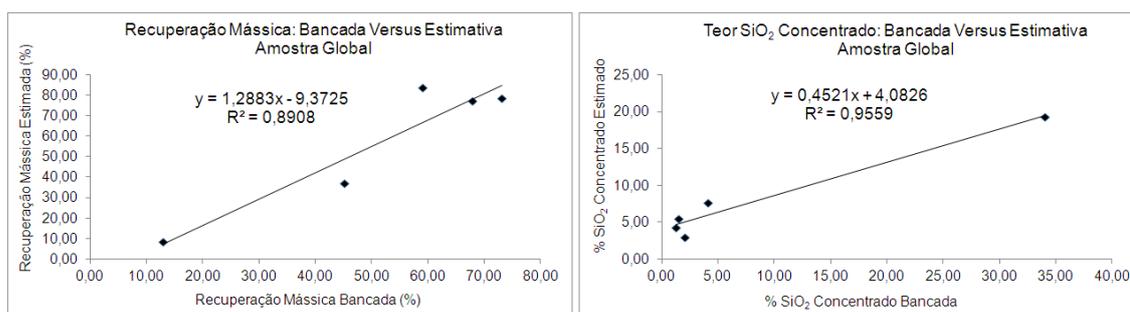


Figura 5.3 – Estimativa mineralógica versus resultados testes de bancada – Amostra Global.

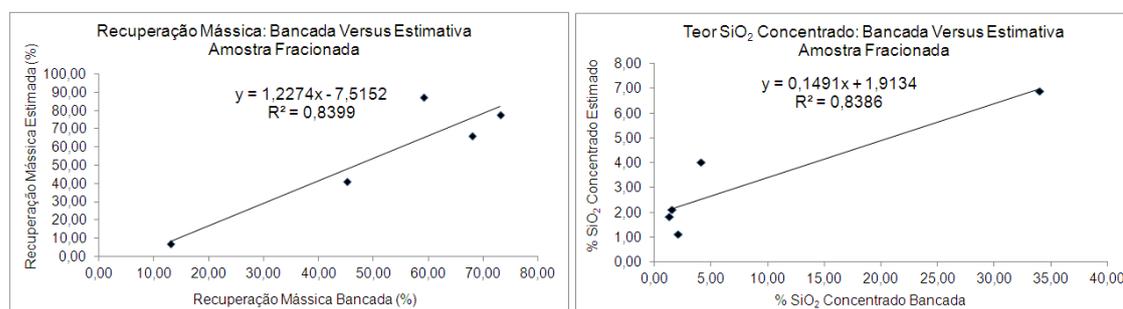


Figura 5.4 – Estimativa mineralógica versus resultados testes de bancada – Amostra Fracionada.

5.4. Resultados dos testes piloto

A tabela V.4 apresenta os resultados dos testes piloto realizados na primeira parte deste trabalho. Todos foram executados no concentrador eletromagnético “*Minimag*”. Os parâmetros utilizados foram os mesmos da industrial. Ressalta-se que os testes piloto complementares realizados na segunda parte deste trabalho serão apresentados juntamente com os resultados dos testes de bancada. Visando estabelecer parâmetros de comparação, paralelamente são apresentados os resultados da industrial. A figura 5.5 apresenta gráficos de correlação para: recuperação mássica, teor de Fe e SiO₂ no concentrado e teor de Fe no rejeito. Verifica-se para todas as amostras que os resultados da piloto são praticamente idênticos aos resultados da industrial, apresentando correlações fortes com R² acima de 0,97, o que de certa forma ratifica a afirmativa de Paula (2009) citada no subcapítulo 4.5.1: “*resultados de testes piloto realizados no concentrador eletromagnético Minimag podem ser utilizados num projeto de forma direta, sem aplicação de nenhum fator de escala. Isso porque o Minimag possui os mesmos mecanismos de atuação do concentrador eletromagnético industrial*”. Assim, entende-se que não é necessário aplicar nenhum fator de conversão dos resultados piloto para a industrial. Eles podem ser utilizados diretamente nos projetos de minério de ferro, no que tange a configuração e dimensionamento de circuitos de concentração magnética.

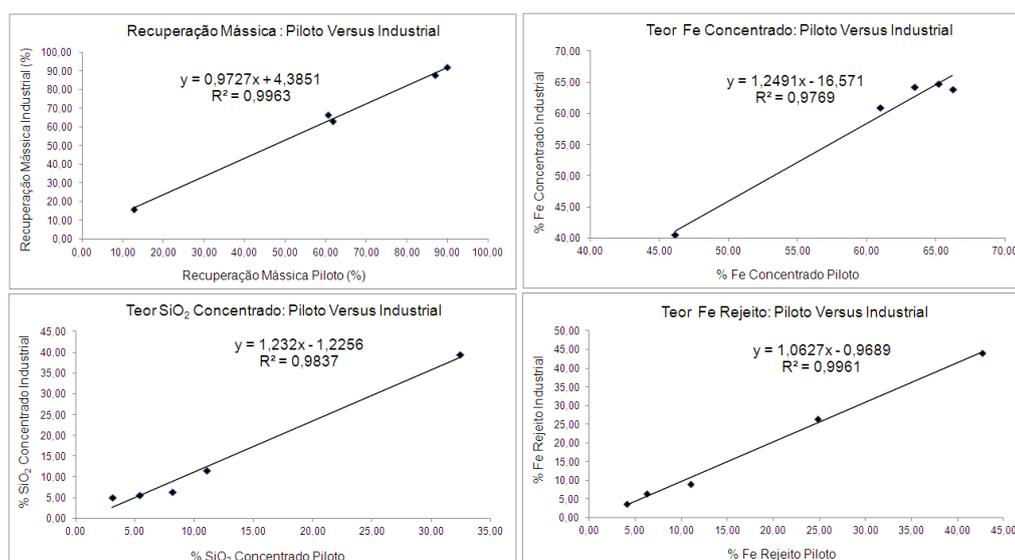


Figura 5.5 – Gráficos de correlação dos resultados piloto versus industrial.

Tabela V.4 – Resultados dos testes piloto versus industrial.

Amostra	Escala	Fluxo	Recuperação Mássica (%)	% Sólidos	Análise Química Global (%)					Campo (Gauss)	Gap (mm)
					Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn		
Alimentação Jones Finos Cauê	Industrial	Alimentação	100,00	55,00	40,91	40,38	0,015	0,715	0,075	9.000	2,5
		Concentrado	63,20	-	61,00	11,48	0,018	0,559	0,086		
		Rejeito	36,80	-	6,39	90,02	0,009	0,981	0,056		
	Piloto	Alimentação	100,00	52,42	40,05	41,11	0,019	0,797	0,087	9.000	2,5
		Concentrado	61,75	-	60,96	11,10	0,019	0,518	0,079		
		Rejeito	38,25	-	6,28	89,51	0,018	1,220	0,099		
Alimentação Jones Alegria	Industrial	Alimentação	100,00	32,22	9,54	84,69	0,008	0,875	0,005	13.000	1,5
		Concentrado	16,00	-	40,51	39,46	0,022	1,107	0,001		
		Rejeito	84,00	-	3,64	93,30	0,006	0,831	0,006		
	Piloto	Alimentação	100,00	30,29	9,39	85,24	0,010	0,758	0,001	13.000	1,5
		Concentrado	12,65	-	46,16	32,47	0,015	0,855	0,003		
		Rejeito	87,35	-	4,06	92,88	0,009	0,744	0,001		
Alimentação Jones Rougher Brucutu	Industrial	Alimentação	100,00	35,00	57,44	16,12	0,009	0,476	0,012	12.600	2,5
		Concentrado	87,70	-	64,24	6,40	0,010	0,451	0,013		
		Rejeito	12,30	-	8,99	85,43	0,007	0,650	0,008		
	Piloto	Alimentação	100,00	35,05	56,64	17,81	0,010	0,415	0,011	12.600	2,5
		Concentrado	86,96	-	63,49	8,17	0,009	0,368	0,010		
		Rejeito	13,04	-	10,98	82,04	0,014	0,728	0,015		
Alimentação Jones Cleaner Brucutu	Industrial	Alimentação	100,00	40,00	61,70	9,96	0,009	0,463	0,010	9.000	2,5
		Concentrado	91,93	-	64,80	5,59	0,009	0,436	0,010		
		Rejeito	8,07	-	26,39	59,76	0,013	0,771	0,009		
	Piloto	Alimentação	100,00	40,33	61,28	10,76	0,017	0,540	0,009	9.000	2,5
		Concentrado	89,94	-	65,18	5,39	0,017	0,420	0,010		
		Rejeito	10,06	-	24,79	61,44	0,027	1,124	0,013		
Alimentação Jones Rougher Pico	Industrial	Alimentação	100,00	30,00	57,25	13,80	0,059	1,042	0,360	12.000	3,8
		Concentrado	66,56	-	63,85	5,14	0,052	0,758	0,254		
		Rejeito	33,44	-	44,12	31,02	0,072	1,605	0,571		
	Piloto	Alimentação	100,00	29,39	56,98	15,14	0,044	0,850	0,275	12.000	3,8
		Concentrado	60,67	-	66,23	3,08	0,033	0,420	0,126		
		Rejeito	39,33	-	42,68	33,83	0,064	1,667	0,563		

5.5. Resultados dos testes de bancada

A figura 5.6 apresenta um gráfico com consolidação dos resultados dos testes realizados na primeira etapa deste trabalho com a amostra de alimentação do Jones de Finos da Usina de Cauê. Nota-se que com o aumento do campo magnético há um aumento da recuperação mássica para concentrado e redução do teor de Fe do rejeito, porém, após o campo magnético de 4000 Gauss o teor de SiO₂ no concentrado apresenta-se

praticamente constante. Esperava-se maiores teores de SiO_2 no concentrado para maiores campos magnéticos, porém os resultados dos testes mostram exatamente o contrário. Isso pode ser explicado pelo fato dos testes com menores campos magnéticos (2000 e 3000 Gauss) terem apresentado recuperações mássicas para concentrado muito baixas, favorecendo ao aumento do teor de SiO_2 , uma vez que a quantidade de minerais de ferro foi pequena para diluir o percentual de quartzo que iria para o concentrado de qualquer forma. Em relação ao parâmetro água de lavagem, o valor de 50mL/s apresenta maior recuperação mássica para concentrado com manutenção de sua qualidade, o que já se esperava, uma vez que maior vazão de água de lavagem significa maior arraste hidrodinâmico de minerais ferrosos para o rejeito.

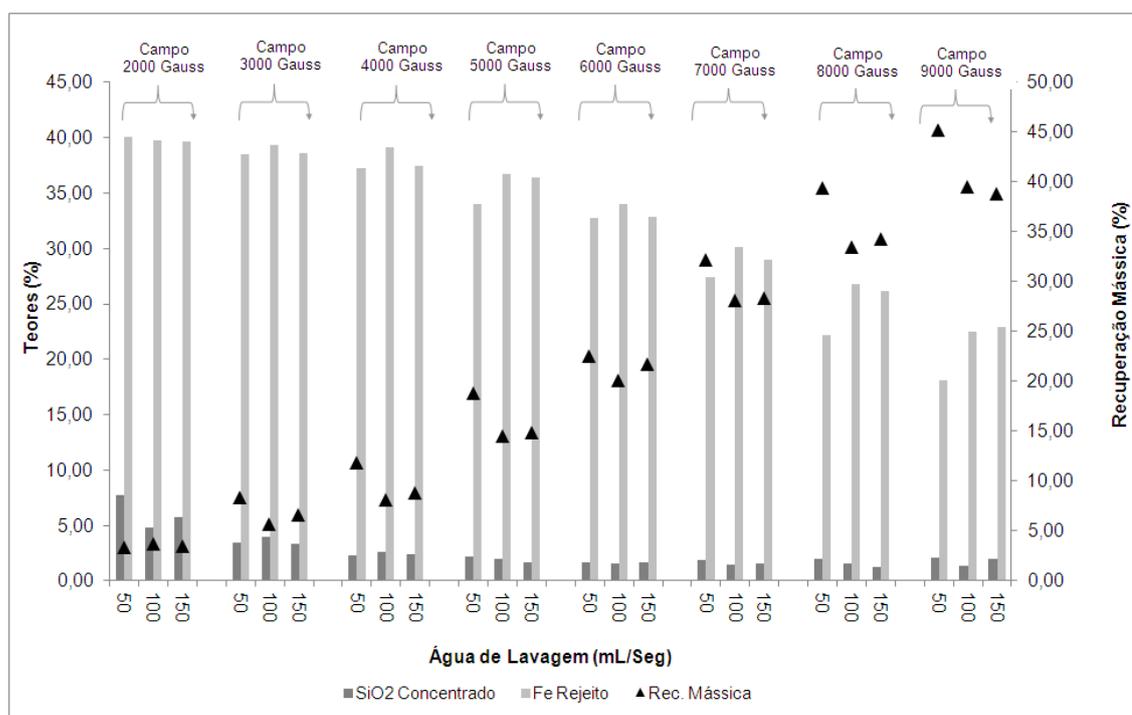


Figura 5.6 – Resumo dos resultados dos testes de bancada realizados com a amostra de alimentação do Jones de Finos da Usina Cauê.

A figura 5.7 apresenta um gráfico com consolidação dos resultados dos testes realizados na primeira etapa deste trabalho com a amostra de alimentação do Jones da Usina de Alegria. Ressalta-se que o teste realizado com 13000 Gauss representa a condição de campo magnético da industrial, sendo realizado somente com vazão de água de lavagem de 50mL/s. Similarmente ao ocorrido com a amostra de Cauê, essa amostra apresenta

aumento de recuperação mássica para concentrado em situações de maiores campos magnéticos e apresenta maiores teores de SiO_2 no concentrado em situações de menores campos magnéticos. Em relação ao parâmetro água de lavagem, o valor de 50mL/s apresenta maior recuperação mássica para concentrado, porém com significativo aumento do teor de SiO_2 no concentrado. Por ser uma amostra muito pobre (8,90% Fe e 86,37% SiO_2), mesmo com mineralogia favorável e os testes sendo realizados em bancada, entende-se que é muito difícil produzir concentrados magnéticos com baixos teores de SiO_2 , utilizando-se apenas um estágio de concentração.

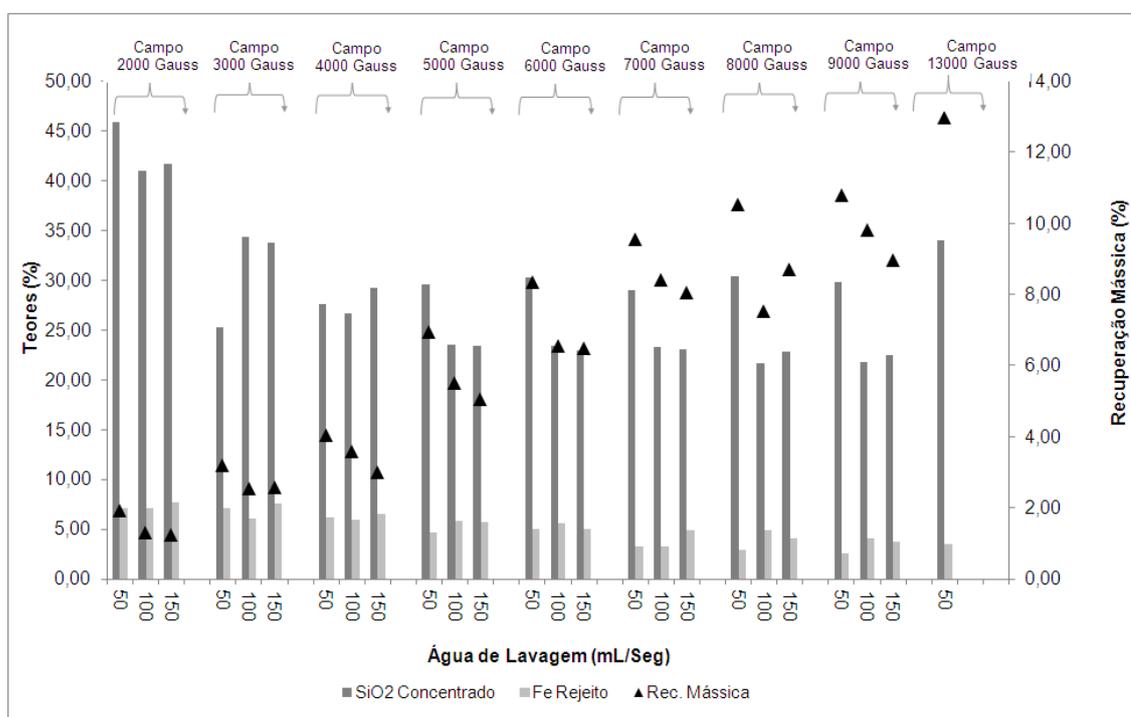


Figura 5.7 – Resumo dos resultados dos testes de bancada realizados com a amostra de alimentação do Jones da Usina de Alegria.

A figura 5.8 apresenta um gráfico com consolidação dos resultados dos testes realizados na primeira etapa deste trabalho com a amostra de alimentação do Jones *rougher* da Usina de Brucutu. Ressalta-se que o teste realizado com 12600 Gauss representa a condição de campo magnético da industrial, sendo realizado somente com vazão de água de lavagem de 50mL/s. Os resultados seguem a mesma tendência das amostras de Cauê e Alegria, diferindo basicamente na influência da água de lavagem, que somente apresenta aumento de recuperação mássica para vazão de 50mL/s, nas situações de

campo magnético de 8000 Gauss e 9000 Gauss. Vale destacar a excelente qualidade do concentrado apresentado em todas as condições de testes, o que ratifica o potencial dessa amostra em produzir concentrados magnéticos com baixos teores de SiO_2 , citado na apresentação dos resultados mineralógicos (subcapítulo 5.2). O elevado teor de Fe no rejeito pode estar associado à limitação operacional que comumente os concentradores estáticos de bancada apresentam. Eles não possuem todos os mecanismos de atuação que um concentrador magnético piloto/industrial possui, fazendo com que o número de parâmetros exploráveis seja pequeno.

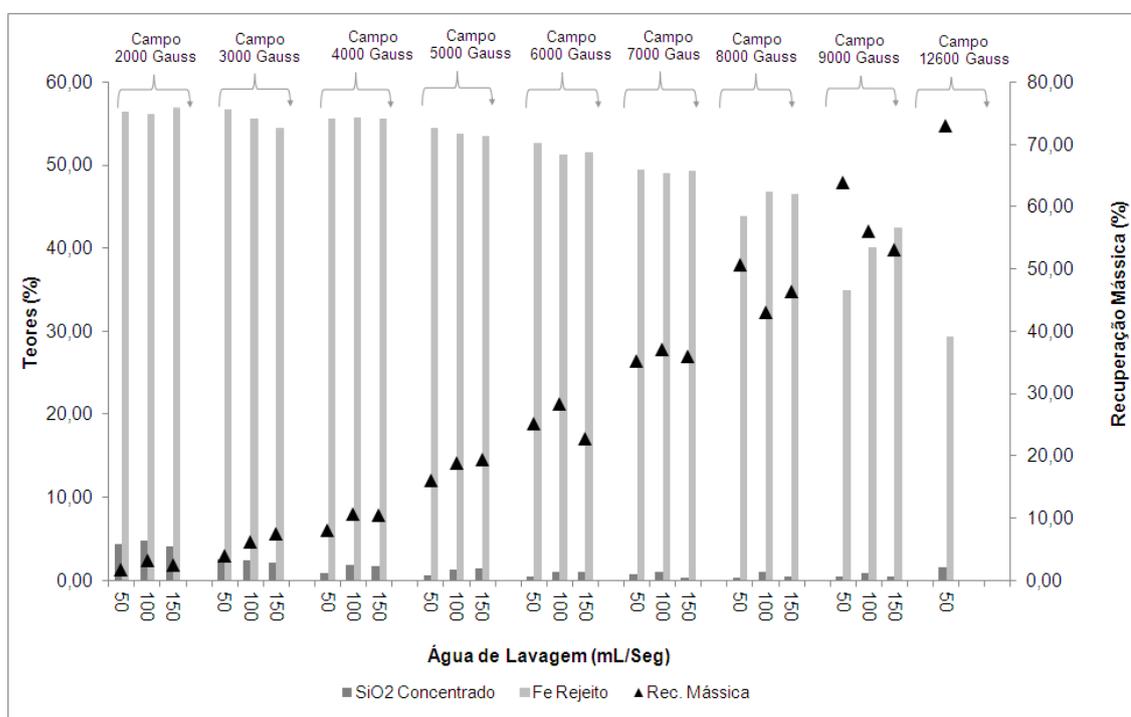


Figura 5.8 – Resumo dos resultados dos testes de bancada realizados com a amostra de alimentação do Jones *rougher* de Brucutu.

A figura 5.9 apresenta um gráfico com consolidação dos resultados dos testes realizados na primeira etapa deste trabalho com a amostra de alimentação do Jones *cleaner* da Usina de Brucutu. Os resultados seguem a mesma tendência do Jones *rougher*, porém o a vazão de água lavagem de 50mL/s apresenta maior recuperação mássica para concentrado em quase todas as condições de campo magnético. A análise realizada no Jones *rougher* para teor de SiO_2 no concentrado e Fe no rejeito é também válida para essa amostra.

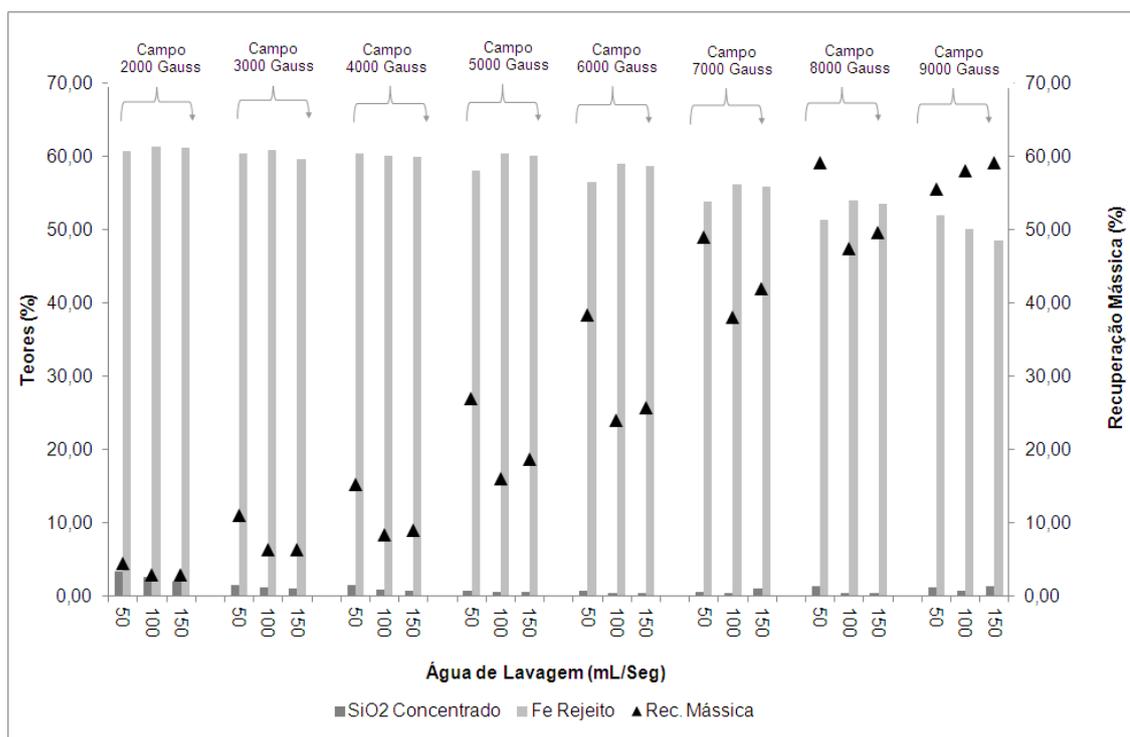


Figura 5.9 – Resumo dos resultados dos testes de bancada realizados com a amostra de alimentação do Jones cleaner de Brucutu.

A figura 5.10 apresenta um gráfico com consolidação dos resultados dos testes realizados na primeira etapa deste trabalho com a amostra de alimentação do Jones rougher da Usina de Pico. Ressalta-se que o teste realizado com 12000 Gauss representa a condição de campo magnético da industrial, sendo realizado somente com vazão de água de lavagem de 50mL/s. As tendências são as mesmas citadas nas análises das demais amostras, com exceção do teor de SiO₂ no concentrado, cujos os maiores valores foram obtidos nas condições de maiores campos magnéticos. O elevado teor de Fe no rejeito pode estar associado à limitação operacional que comumente os concentradores estáticos de bancada apresentam, somada à predisposição dessa amostra em produzir rejeitos com elevados teores de Fe, conforme citado na apresentação dos resultados mineralógicos (subcapítulo 5.2).

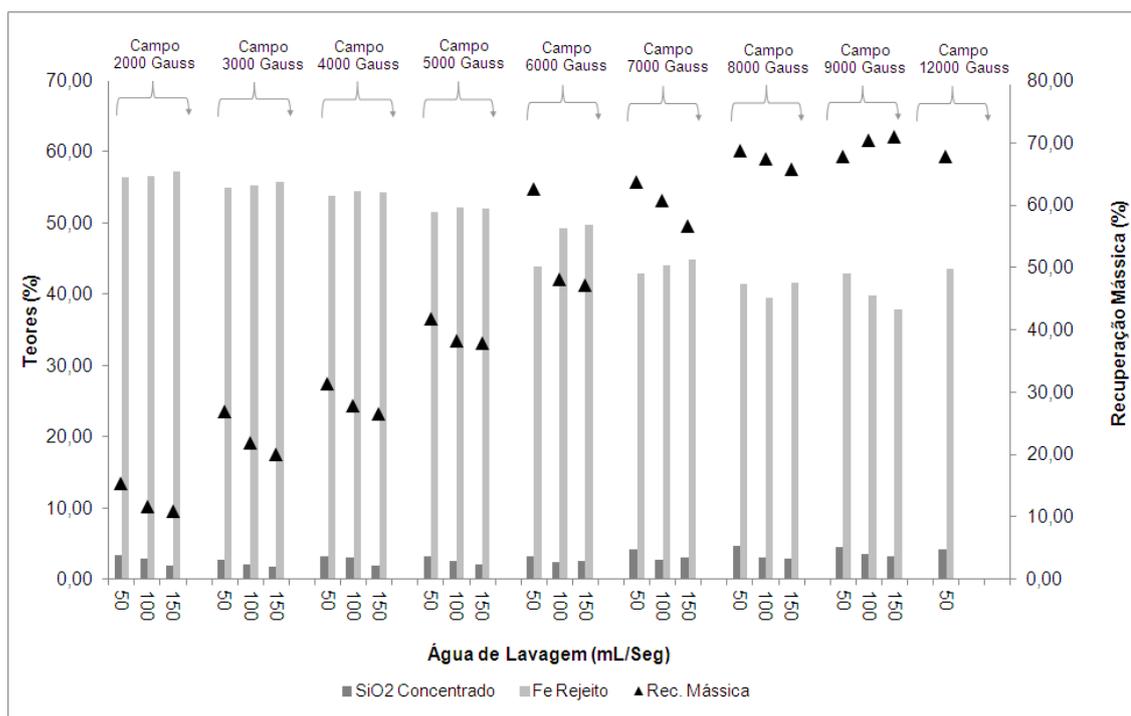


Figura 5.10 – Resumo dos resultados dos testes de bancada realizados com a amostra de alimentação do Jones rougher de Pico.

5.6. Análise de correlação dos resultados bancada versus piloto

A tabela V.5 apresenta um comparativo dos resultados de bancada versus piloto. Para tanto, dentre os vários testes de bancada executados na primeira batelada, utilizou-se aquele realizado na mesma condição de campo magnético da piloto. Vale lembrar que os testes de bancada foram realizados no concentrador eletromagnético estático modelo L4 e os testes piloto no concentrador eletromagnético contínuo *Minimag* (nome comercial). Percebe-se que somente para as amostras de alimentação do Jones de Alegria e alimentação do Jones rougher do Pico foi possível conseguir resultados em bancada similares aos da piloto. Para as demais amostras, os testes de bancada apresentam, em relação a piloto, menores teores de SiO₂ no concentrado e maiores teores de Fe no rejeito. Acredita-se que isso esteja associado à característica de cada amostra somada à limitação operacional que comumente os concentradores estáticos de bancada apresentam. Como já citado neste trabalho, eles não possuem os mesmos mecanismos de atuação de um concentrador WHIMS de alimentação contínua (piloto/industrial).

Tabela V.5 – Resultados dos testes de bancada versus piloto (1ª batelada de testes)

Amostra	Escala	Fluxo	Recuperação Mássica (%)	Análise Química Global (%)					Campo (Gauss)	Gap (mm)
				Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn		
Alimentação Jones Finos Cauê	Bancada	Alimentação	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	9.000	2,5
		Concentrado	45,18	67,66	2,06	0,020	0,37	0,077		
		Rejeito	54,82	18,06	73,61	0,014	0,59	0,048		
	Piloto	Alimentação	100,00	40,05	41,11	0,019	0,80	0,087	9.000	2,5
		Concentrado	61,75	60,96	11,10	0,019	0,52	0,079		
		Rejeito	38,25	6,28	89,51	0,018	1,22	0,099		
Alimentação Jones Alegria	Bancada	Alimentação	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	13.000	1,5
		Concentrado	12,98	44,86	34,01	0,018	0,89	0,015		
		Rejeito	89,20	3,45	93,85	0,009	0,56	0,002		
	Piloto	Alimentação	100,00	9,39	85,24	0,010	0,76	0,001	13.000	1,5
		Concentrado	12,65	46,16	32,47	0,015	0,85	0,003		
		Rejeito	87,35	4,06	92,88	0,009	0,74	0,001		
Alimentação Jones Rougher Brucutu	Bancada	Alimentação	100,00	56,00	18,02	0,011	0,39	0,023	12.600	2,5
		Concentrado	73,16	68,65	1,54	0,014	0,26	0,016		
		Rejeito	26,84	29,30	57,75	0,015	0,35	0,009		
	Piloto	Alimentação	100,00	56,64	17,81	0,010	0,42	0,011	12.600	2,5
		Concentrado	86,96	63,49	8,17	0,009	0,37	0,010		
		Rejeito	13,04	10,98	82,04	0,014	0,73	0,015		
Alimentação Jones Cleaner Brucutu	Bancada	Alimentação	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	9.000	2,5
		Concentrado	59,13	68,45	1,26	0,016	0,36	0,019		
		Rejeito	40,87	48,53	28,95	0,024	0,63	0,016		
	Piloto	Alimentação	100,00	61,28	10,76	0,017	0,54	0,009	9.000	2,5
		Concentrado	89,94	65,18	5,39	0,017	0,42	0,010		
		Rejeito	10,06	24,79	61,44	0,027	1,12	0,013		
Alimentação Jones Rougher Pico	Bancada	Alimentação	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	12.000	3,8
		Concentrado	67,97	64,40	4,10	0,048	0,93	0,100		
		Rejeito	32,03	43,60	35,20	0,047	0,97	0,342		
	Piloto	Alimentação	100,00	56,98	15,14	0,044	0,85	0,275	12.000	3,8
		Concentrado	60,67	66,23	3,08	0,033	0,42	0,126		
		Rejeito	39,33	42,68	33,83	0,064	1,67	0,563		

A figura 5.11 apresenta gráficos de correlação entre os testes de bancada versus piloto para: recuperação mássica, teor de Fe e SiO₂ no concentrado e teor de Fe no rejeito. Apesar do pequeno espaço amostral (apenas cinco pontos), verifica-se uma tendência dos testes de bancada produzir menores percentuais para os quesitos avaliados. Dessa forma, entende-se que é possível correlacionar os resultados obtidos nos testes bancada com os resultados da piloto. Percebe-se que as correlações encontradas são de média

para forte apresentando R^2 superior a 0,77. Acredita-se que aumentando o espaço amostral, é possível fortalecer o nível dessas correlações e, assim, poder utilizar as equações dos gráficos para transpor os resultados de bancada para piloto.

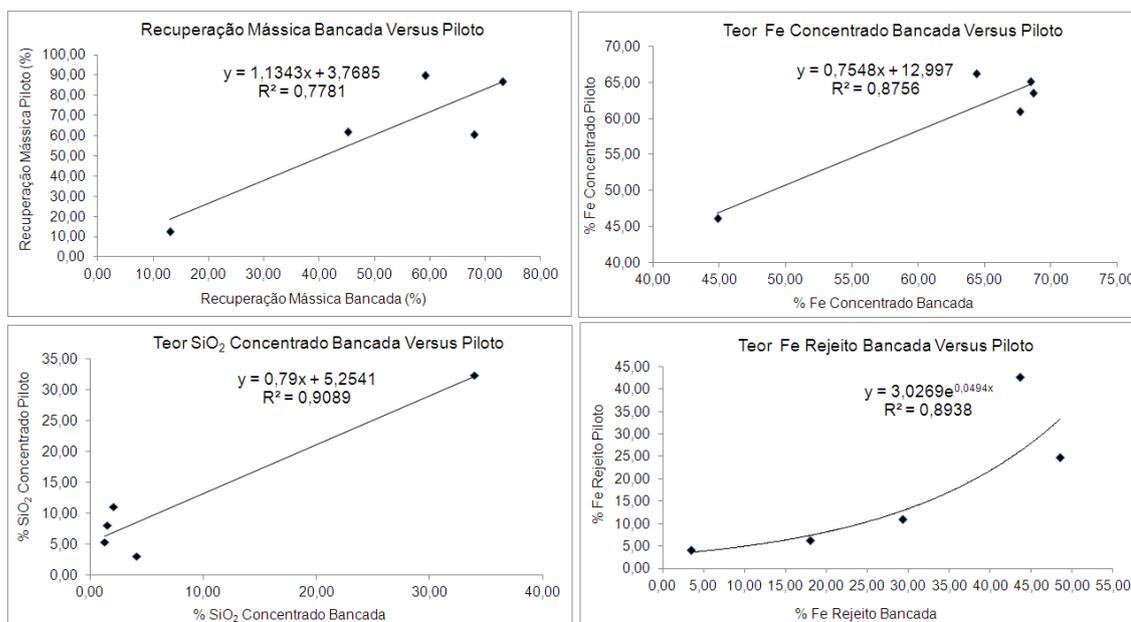


Figura 5.11 – Gráficos de correlação dos resultados bancada versus piloto (1ª batelada de testes).

Visando aumentar o espaço amostral e confirmar os resultados de correlação obtidos entre os testes de bancada e piloto, realizou-se uma segunda batelada de testes. Para tanto, utilizou-se cinco amostras oriundas da Barragem de Fábrica (unidade Vale, localizada às margens da BR 040 a aproximadamente 70km de Belo Horizonte). Ressalta-se que foram realizados testes de bancada e piloto, que seguiram o mesmo procedimento da primeira batelada de testes, porém sendo realizado para cada amostra somente um teste de bancada e um piloto. A tabela V.6 apresenta um comparativo dos resultados dessa segunda batelada de testes. Todos os testes de bancada apresentam, em relação a piloto, menores teores de SiO₂ no concentrado e maiores teores no rejeito. Porém, de maneira geral verifica-se para essa segunda batelada de testes a mesma tendência da primeira, mantendo o nível de correlação.

Tabela V.6 – Resultados dos testes bancada versus piloto (2ª batelada de testes)

Amostra	Escala	Fluxo	Recuperação Mássica (%)	Análise Química Global (%)					Campo (Gauss)	Gap (mm)
				Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn		
Barragem de Fábrica Grupo 01	Bancada	Alimentação	100,00	38,30	40,44	0,046	1,59	0,309	11.000	2,5
		Concentrado	34,55	61,71	6,90	0,055	1,31	0,300		
		Rejeito	65,45	26,38	57,35	0,041	1,72	0,311		
	Piloto	Alimentação	100,00	37,38	42,29	0,048	1,56	0,309	11.000	2,5
		Concentrado	54,34	59,48	11,52	0,052	1,13	0,288		
		Rejeito	45,66	12,49	76,64	0,046	2,19	0,372		
Barragem de Fábrica Grupo 02	Bancada	Alimentação	100,00	29,54	53,05	0,050	1,94	0,388	11.000	2,5
		Concentrado	16,02	60,20	8,49	0,059	1,49	0,330		
		Rejeito	83,98	24,37	61,17	0,039	1,81	0,339		
	Piloto	Alimentação	100,00	30,58	59,21	0,050	1,90	0,374	11.000	2,5
		Concentrado	39,38	56,34	15,22	0,053	1,28	0,319		
		Rejeito	60,62	11,80	77,94	0,045	2,07	0,401		
Barragem de Fábrica Grupo 03	Bancada	Alimentação	100,00	30,16	51,74	0,048	1,83	0,339	11.000	2,5
		Concentrado	15,56	58,30	11,22	0,055	1,61	0,336		
		Rejeito	84,44	25,38	55,11	0,039	1,98	0,361		
	Piloto	Alimentação	100,00	30,15	51,57	0,049	1,90	0,347	11.000	2,5
		Concentrado	35,49	56,08	16,12	0,050	1,32	0,282		
		Rejeito	64,51	15,26	72,32	0,050	2,30	0,392		
Barragem de Fábrica Grupo 04	Bancada	Alimentação	100,00	33,94	46,09	0,049	1,94	0,367	11.000	2,5
		Concentrado	18,38	60,98	7,89	0,051	1,49	0,341		
		Rejeito	81,62	27,97	54,73	0,039	1,92	0,378		
	Piloto	Alimentação	100,00	34,38	46,59	0,049	1,76	0,358	11.000	2,5
		Concentrado	45,99	58,91	12,37	0,051	1,24	0,293		
		Rejeito	54,01	13,09	75,79	0,052	2,47	0,453		
Barragem de Fábrica Grupo 05	Bancada	Alimentação	100,00	37,37	41,44	0,046	1,99	0,366	11.000	2,5
		Concentrado	32,29	59,74	8,48	0,059	1,85	0,387		
		Rejeito	67,71	26,91	56,49	0,038	1,91	0,348		
	Piloto	Alimentação	100,00	37,37	41,44	0,046	1,99	0,366	11.000	2,5
		Concentrado	46,93	58,87	11,64	0,049	1,29	0,322		
		Rejeito	53,07	14,76	72,44	0,050	2,39	0,454		

A figura 5.12 apresenta gráficos de correlação entre os testes de bancada versus piloto, acumulando os resultados da primeira e segunda batelada de testes. Apesar do espaço amostral ainda ser pequeno (dez pontos), verifica-se que ao inserir os resultados da segunda batelada de testes, a tendência e o nível de correlação continuaram os mesmos. Dessa forma, mantém-se a afirmativa que é possível correlacionar os resultados obtidos

nos testes bancada com os resultados da piloto, podendo, assim, utilizar as equações dos gráficos para transpor os resultados de bancada para piloto. Isso traria um ganho muito grande para os trabalhos de caracterização envolvendo o processo de concentração magnética, uma vez que, atualmente no CPT, é necessária uma massa de amostra de furo de sonda de aproximadamente 80kg, para viabilizar a realização de um teste piloto de concentração magnética. Caso, sejam realizados somente testes de bancada, essa massa se reduziria para 20kg, ou seja, quatro vezes menos, uma redução significativa, que proporcionaria ganhos tangíveis como: redução de custos (amostra de furo de sonda possui custo elevado) e redução de tempo (testes piloto, por serem mais complexos, são também mais morosos).

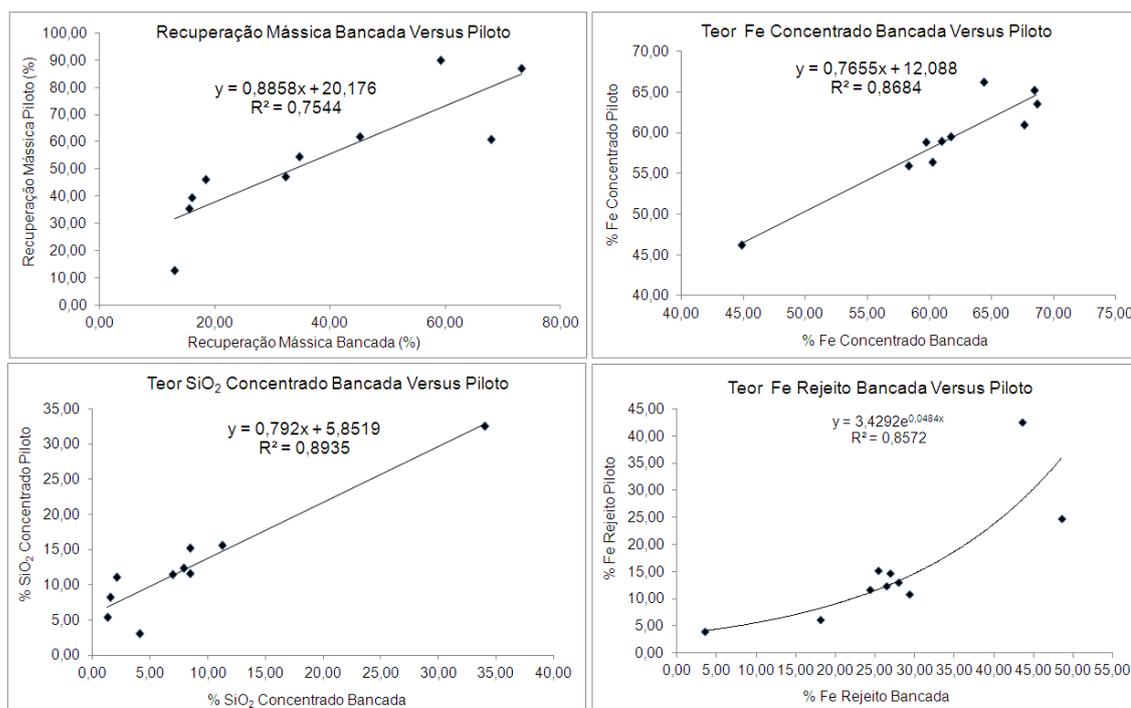


Figura 5.12 – Gráficos de correlação dos resultados bancada versus piloto (acumulado 1^a e 2^a batelada de testes).

Utilizando as equações dos gráficos de correlações (figura 5.12), calculou-se para as amostras da segunda batelada de testes os teores de Fe e SiO₂ do concentrado e o teor de Fe do rejeito. Por apresentar R² mais baixo (correlação mais fraca), a recuperação mássica não foi contemplada. A tabela V.7 apresenta um comparativo entre os resultados “Piloto Real” (obtidos nos testes) e “Piloto Calculado” (calculado pelas

equações dos gráficos de correlação da figura 5.12). Nota-se que, apesar de alguns desvios, os resultados calculados são similares aos resultados reais. Isso confirma que realmente é possível utilizar equações de regressão para estimar resultados piloto, a partir dos resultados de bancada. Entretanto, entende-se que para isso seria necessário a realização de testes complementares, uma vez que o espaço amostral (número de amostras estudadas) foi pequeno.

Tabela V.7 – Comparativo dos resultados piloto real versus piloto calculado

Teor Fe Concentrado		Teor SiO ₂ Concentrado		Teor Fe Rejeito	
Piloto Real	Piloto Calculado	Piloto Real	Piloto Calculado	Piloto Real	Piloto Calculado
59,48	59,33	11,52	11,32	12,49	12,29
56,34	58,17	15,22	12,58	11,80	11,15
55,98	56,72	15,61	14,74	15,26	11,71
58,91	58,77	12,37	12,10	13,09	13,28
58,87	57,82	11,64	12,57	14,76	12,61

6. CONCLUSÕES

- Em relação às características mineralógicas, todas as amostras apresentam o quartzo como principal mineral de ganga e a hematita como principal mineral de ferro, variando somente em relação à trama, forma e textura, com predominância de hematitas compactas. Tendo em vista o processo de concentração magnética, com exceção da amostra de alimentação do Jones *rougher* do Pico, que apresenta 4,23% de quartzo misto, as demais não apresentam restrições mineralógicas.
- Este trabalho confirma que a interpretação mineralógica é uma boa ferramenta para estimar recuperação mássica e qualidade de concentrado para os processos de concentração magnética, o que possibilita ter o conhecimento prévio sobre o potencial de concentrabilidade de uma determinada amostra.
- A interpretação mineralógica realizada com a amostra global apresentou correlações mais fortes que a amostra fracionada.
- Os resultados dos testes piloto ficaram praticamente idênticos aos resultados da industrial, apresentando correlações fortes com R^2 acima de 0,97.
- Para a maioria das amostras estudadas, os testes de bancada apresentaram, em relação a piloto, menores teores de SiO_2 no concentrado e maiores teores de Fe no rejeito.
- Este trabalho confirma que é possível correlacionar os resultados obtidos nos testes bancada com os resultados piloto. Os gráficos de correlação apresentaram R^2 superior a 0,77 (não são correlações fortes, mas são médias). Assim, verifica-se que é possível utilizar equações de correlação para estimar resultados piloto, a partir dos resultados de bancada. Entretanto, entende-se que para isso seria

necessário a realização de testes complementares, uma vez que o espaço amostral (número de amostras estudadas) foi pequeno.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar interpretação mineralógica para amostras fracionadas em um número maior de faixas. Acredita-se que o resultado negativo com amostra fracionada neste trabalho esteja associado ao pequeno número de faixas (somente duas: <0,045mm e <0,045mm).
- Realizar testes adicionais de concentração magnética nas escalas de bancada e piloto, visando aumentar o espaço amostral e, conseqüentemente, melhorar a força das correlações.
- Separar os testes de concentração magnética por abertura do *gap* e granulometria de alimentação. Acredita-se que as correlações serão mais fortes em grupos de testes/amostras mais homogêneos. A realização de um maior número de testes tornará essa separação possível.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, J.C., *Magnetism and Magnetic Materials*. Chapman and Hall Ltd, London, 1968, p.24.

BLUM, P. Magnetic Susceptibility In. BLUM, P. *Physical Properties Handbook: A Guide to the Shipboard Measurement of Physical Properties of Deep-sea Cores by the Ocean Drilling Program*. 1. ed. Chapter 04, 1997, p.4-1 – 4-10.

BONOTTO, D. M. Sistema de Observação Microscópica. Disponível em: <[HTTP://www.rc.unesp.br/igce/petrologia](http://www.rc.unesp.br/igce/petrologia). Acesso em 2009.

CALIXTO, M. F. Rotas para concentração de rejeitos de minério de ferro itabirítico, Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia da UFMG, 2001, 100p. Belo Horizonte, MG.

CAVANOUGH, G. L., HOLTHAM, P. N. and POWELL, T. M. Magnetic Susceptibility Measurement Applied to the Minerals Industry. *Minerals Engineering*, Volume 19, p. 1588-1599, Jul. 2006.

DANA J. e HURLBUT R. *Manual de Mineralogia*. Editora Livros Técnicos e Científicos, 1969, 536 p. São Paulo, SP.

FAULSTICH, F. R. L. Guia de utilização do microscópio ótico petrográfico de luz transmitida e refletida. Diretoria de Desenvolvimento de Projetos Minerais, VALE, 2008, 119p. Santa Luzia, MG.

FERREIRA, R. F. Metodologia para quantificação mineralógica em microscópio ótico. Centro de Pesquisas Tecnológicas, VALE, 2011, 14p. Mariana, MG.

FUJIMORI S. e FERREIRA Y.A. Introdução ao uso do microscópio petrográfico. Centro Editorial e Didático da TFBA, 1979, 204pp .Salvador, BA.

HUNT C. P., MOSKOWITZ B. M., and BANEJEE S. K. Magnetic Properties of Rocks and Minerals, *Rock Physics and Phase Relations, A Handbook of Physical Constants*, American Geophysical Union, Reference Shelf 3, 1995.

KING, R. P. *Modeling & Simulation of Mineral Processing Systems*. Butterworth, Heinemann, Oxford, England, 2001.

KLEIN, C. and DUTROW B. Crystal growth and defects; twinning, color, and magnetism. In: KLEIN, C. and DUTROW B. *The Manual of Mineral Science*. 23. ed. John Wiley & Sons, INC, 2007a, Chapter 10, p.217-244.

KLEIN, C. and DUTROW B. Physical properties of minerals. In: KLEIN, C. and DUTROW B. The Manual of Mineral Science. 23. ed. John Wiley & Sons, INC, 2007b, Chapter 2, p.19-36.

NESSET, J. E. and FINCH, J. A. Determination of Magnetic Parameters for Field-dependent Susceptibility Minerals by Frantz Isodynamic Magnetic Separator. Mineral Processing Extr. Metall., Volume 89, p. 161-166, Dec. 1980.

PAULA, N. N. Treinamento de Concentração Magnética Convencional Aplicada em Minério de Ferro. VALE, 2009. Belo Horizonte, MG.

PAULA, N. N. Metodologia para realização de testes de concentração magnética. Centro de Pesquisas Tecnológicas, VALE, 2010, 10p. Mariana, MG.

QUEIROZ, L. A. Treinamento de Mineralogia. Interpretação Mineralógica Aplicada em Definição de Rota de Processo de Minério de Ferro. VALE, 2005. Mariana, MG.

QUEIROZ, L.A. e BRANDÃO, P.R.G. Aspectos Mineralógicos Relacionados à Concentração Magnética de Minério de Ferro Itabirítico. Metalurgia & Materiais, Volume 65, p. 148-151, abr. 2009.

LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A. e ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de Minérios. In: LUZ, A. B. e SAMPAIO, J. A.. Separação Magnética e Eletrostática. 4. ed. CETEM/MCT, 2004, Capítulo 8, p.305-329.

SCHNEIDER, C. L. e CALIXTO, M. F. Desenvolvimento de modelo para concentradores magnéticos tipo Jones. In: XXXVI SEMINÁRIO DE MINÉRIO DE FERRO / VII SIMPÓSIO DE MINÉRIO DE FERRO, Anais v.2, 2006, 619-633, 17p. Ouro Preto, MG.

SILVA, M. B. Avaliação dos concentradores magnéticos de alta intensidade de campo magnético tipo Jones da HUMBOLDT, INBRÁS e GAUSTEC: Relatório técnico da gerência de processo de tratamento de minério, VALE, 2012, 26p. Belo Horizonte, MG.

SVOBODA, J. Magnetic Techniques for the Treatment of Materials. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2004.

WASMUTH, H. D. and UNKELBACH, K. H. Recent Developments in Magnetic Separation of Feebly Magnetic Minerals. Minerals Engineering, Volume 4, p. 825-837, 1991.

9. ANEXOS

9.1. Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones de Cauê (Teste 01 a 12).

Teste	Fluxo	Água Lavagem mL/seg	Campo (Gauss)	Recup Mássica (%)	Análise Química Global (%)								
					Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
01	Alimentação	50	2000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			3,36	63,73	7,69	0,017	0,25	0,050	0,181	0,026	0,001	0,59
	Rejeito			96,64	40,04	41,54	0,018	0,51	0,060	0,134	0,030	0,037	0,39
02	Alimentação	50	3000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			8,40	66,62	3,40	0,012	0,24	0,052	0,173	0,011	0,001	0,38
	Rejeito			91,60	38,53	44,40	0,015	0,47	0,062	0,135	0,023	0,046	0,40
03	Alimentação	50	4000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			11,83	67,96	2,30	0,011	0,18	0,052	0,155	0,013	0,001	0,34
	Rejeito			88,17	37,27	45,54	0,014	0,43	0,062	0,132	0,015	0,034	0,38
04	Alimentação	50	5000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			18,79	68,22	2,23	0,013	0,39	0,059	0,167	0,012	0,001	0,26
	Rejeito			81,21	34,03	50,96	0,013	0,45	0,059	0,133	0,018	0,052	0,37
05	Alimentação	50	6000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			22,56	68,86	1,66	0,014	0,21	0,062	0,183	0,014	0,001	0,27
	Rejeito			77,44	32,77	52,78	0,014	0,42	0,057	0,125	0,015	0,054	0,31
06	Alimentação	50	7000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			32,24	68,55	1,84	0,015	0,26	0,067	0,186	0,007	0,001	0,27
	Rejeito			67,76	27,45	60,34	0,014	0,50	0,056	0,112	0,017	0,066	0,34
07	Alimentação	50	8000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			39,42	68,58	2,02	0,017	0,24	0,069	0,193	0,006	0,004	0,25
	Rejeito			60,58	22,19	67,75	0,013	0,55	0,050	0,095	0,012	0,080	0,31
08	Alimentação	50	9000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			45,18	67,66	2,06	0,020	0,37	0,077	0,214	0,041	0,010	0,28
	Rejeito			54,82	18,06	73,61	0,014	0,59	0,048	0,098	0,043	0,087	0,34
09	Alimentação	100	2000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			3,76	66,10	4,78	0,013	0,20	0,053	0,195	0,023	0,001	0,34
	Rejeito			96,24	39,81	42,41	0,011	0,41	0,061	0,133	0,019	0,001	0,28
10	Alimentação	100	3000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			5,68	66,37	3,94	0,015	0,33	0,052	0,182	0,025	0,007	0,19
	Rejeito			94,32	39,30	42,88	0,014	0,42	0,059	0,136	0,017	0,024	0,27
11	Alimentação	100	4000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			8,15	67,69	2,66	0,012	0,19	0,053	0,173	0,017	0,001	0,18
	Rejeito			91,85	39,16	43,98	0,014	0,42	0,059	0,134	0,020	0,042	0,24
12	Alimentação	100	5000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			14,57	68,28	1,96	0,012	0,22	0,057	0,175	0,017	0,001	0,20
	Rejeito			85,43	36,74	47,36	0,013	0,42	0,056	0,132	0,017	0,046	0,26

9.2. Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones de Cauê (Teste 13 a 24).

Teste	Fluxo	Água Lavagem mL/seg	Campo (Gauss)	Recup Mássica (%)	Análise Química Global (%)								
					Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
13	Alimentação	100	6000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			20,14	68,34	1,61	0,014	0,19	0,061	0,186	0,015	0,001	0,22
	Rejeito			79,86	33,97	50,72	0,013	0,41	0,056	0,122	0,016	0,050	0,28
14	Alimentação	100	7000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			28,11	68,05	1,47	0,015	0,22	0,065	0,196	0,016	0,001	0,20
	Rejeito			71,89	30,16	56,09	0,013	0,41	0,052	0,115	0,016	0,047	0,23
15	Alimentação	100	8000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			33,44	68,61	1,52	0,015	0,23	0,069	0,207	0,017	0,001	0,21
	Rejeito			66,56	26,81	60,48	0,013	0,45	0,050	0,102	0,017	0,055	0,27
16	Alimentação	100	9000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			39,58	67,84	1,40	0,015	0,22	0,071	0,207	0,016	0,001	0,21
	Rejeito			60,42	22,47	66,98	0,011	0,43	0,045	0,091	0,018	0,065	0,24
17	Alimentação	150	2000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			3,54	65,05	5,77	0,011	0,16	0,049	0,192	0,018	0,001	0,37
	Rejeito			96,46	39,70	43,02	0,012	0,40	0,058	0,134	0,016	0,016	0,27
18	Alimentação	150	3000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			6,57	67,44	3,39	0,009	0,18	0,049	0,170	0,014	0,001	0,25
	Rejeito			93,43	38,56	44,24	0,013	0,39	0,057	0,132	0,018	0,040	0,27
19	Alimentação	150	4000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			8,88	68,43	2,38	0,010	0,23	0,052	0,170	0,015	0,001	0,19
	Rejeito			91,12	37,42	46,21	0,012	0,38	0,060	0,134	0,015	0,019	0,26
20	Alimentação	150	5000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			14,83	68,57	1,62	0,012	0,17	0,055	0,173	0,015	0,001	0,19
	Rejeito			85,17	36,39	47,86	0,014	0,42	0,060	0,132	0,018	0,025	0,21
21	Alimentação	150	6000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			21,77	68,34	1,63	0,012	0,18	0,058	0,180	0,016	0,001	0,19
	Rejeito			78,23	32,83	51,88	0,012	0,39	0,054	0,125	0,016	0,055	0,23
22	Alimentação	150	7000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			28,39	68,73	1,56	0,014	0,22	0,063	0,189	0,013	0,001	0,20
	Rejeito			71,61	28,95	57,60	0,012	0,42	0,052	0,112	0,017	0,054	0,22
23	Alimentação	150	8000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			34,33	68,43	1,27	0,015	0,21	0,069	0,208	0,015	0,001	0,24
	Rejeito			65,67	26,13	61,45	0,012	0,46	0,052	0,102	0,017	0,058	0,27
24	Alimentação	150	9000	100,00	40,96	41,06	0,023	0,74	0,074	0,034	0,001	0,001	0,41
	Concentrado			38,79	68,28	2,00	0,017	0,33	0,068	0,200	0,020	0,001	0,31
	Rejeito			61,21	22,88	65,49	0,012	0,48	0,045	0,094	0,023	0,069	0,37

9.3. Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones de Alegria (Teste 01 a 12).

Teste	Fluxo	Água Lavagem mL/seg	Campo (Gauss)	Recup. Mássica (%)	Análise Química Global (%)								
					Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
01	Alimentação	50	2000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			1,91	37,12	45,87	0,012	0,32	0,012	0,028	0,020	0,058	0,82
	Rejeito			98,09	7,08	88,04	0,009	0,59	0,001	0,003	0,010	0,121	0,41
02	Alimentação	50	3000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			3,19	50,77	25,30	0,020	0,28	0,025	0,034	0,010	0,017	1,32
	Rejeito			96,81	7,11	88,67	0,008	0,57	0,001	0,002	0,015	0,131	0,40
03	Alimentação	50	4000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			4,03	50,71	27,54	0,011	0,29	0,015	0,046	0,012	0,017	0,23
	Rejeito			95,97	6,13	89,66	0,011	0,68	0,001	0,001	0,019	0,126	0,42
04	Alimentação	50	5000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			6,96	48,11	29,54	0,014	0,41	0,017	0,042	0,040	0,043	0,72
	Rejeito			93,04	4,61	92,06	0,008	0,72	0,001	0,001	0,003	0,142	0,37
05	Alimentação	50	6000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			8,35	47,39	30,31	0,013	0,49	0,014	0,045	0,013	0,068	0,49
	Rejeito			91,65	5,06	91,55	0,006	0,50	0,004	0,007	0,015	0,030	0,24
06	Alimentação	50	7000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			9,56	48,76	29,03	0,015	0,77	0,014	0,048	0,016	0,098	0,50
	Rejeito			90,44	3,25	94,32	0,007	0,59	0,001	0,001	0,003	0,149	0,37
07	Alimentação	50	8000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			10,54	47,78	30,43	0,018	0,84	0,015	0,051	0,020	0,165	0,55
	Rejeito			89,46	2,91	94,77	0,008	0,57	0,001	0,001	0,003	0,140	0,33
08	Alimentação	50	9000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			10,80	48,05	29,77	0,017	0,84	0,014	0,052	0,024	0,139	0,58
	Rejeito			89,20	2,61	95,38	0,007	0,55	0,001	0,001	0,002	0,137	0,39
09	Alimentação	50	13000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			12,98	44,86	34,01	0,018	0,89	0,015	0,051	0,025	0,133	0,59
	Rejeito			89,20	3,45	93,85	0,009	0,56	0,002	0,001	0,002	0,138	0,36
10	Alimentação	100	2000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			1,29	40,19	41,00	0,010	0,31	0,019	0,034	0,023	0,026	0,87
	Rejeito			98,71	7,12	88,14	0,009	0,56	0,001	0,001	0,012	0,133	0,36
11	Alimentação	100	3000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			2,54	44,91	34,34	0,011	0,29	0,012	0,035	0,022	0,048	0,65
	Rejeito			97,46	6,02	90,50	0,008	0,60	0,001	0,001	0,003	0,144	0,42
12	Alimentação	100	4000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			3,60	50,50	26,64	0,012	0,30	0,011	0,042	0,027	0,046	0,48
	Rejeito			96,40	5,92	89,52	0,013	0,70	0,001	0,002	0,028	0,137	0,37

9.4. Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones de Alegria (Teste 13 a 25).

Teste	Fluxo	Água Lavagem mL/seg	Campo (Gauss)	Recup. Mássica (%)	Análise Química Global (%)								
					Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
13	Alimentação	100	5000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			5,52	52,98	23,48	0,013	0,37	0,011	0,048	0,021	0,061	0,48
	Rejeito			94,48	5,80	90,06	0,013	0,81	0,001	0,001	0,028	0,144	0,33
14	Alimentação	100	6000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			6,55	53,06	23,38	0,013	0,41	0,011	0,046	0,021	0,065	0,46
	Rejeito			93,45	5,62	90,27	0,007	0,45	0,009	0,007	0,014	0,030	0,26
15	Alimentação	100	7000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			8,42	52,98	23,31	0,014	0,55	0,011	0,050	0,021	0,093	0,50
	Rejeito			91,58	3,25	94,13	0,008	0,56	0,001	0,001	0,003	0,144	0,36
16	Alimentação	100	8000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			7,52	53,49	21,66	0,014	0,57	0,011	0,050	0,019	0,094	0,57
	Rejeito			92,48	4,94	91,31	0,007	0,50	0,017	0,008	0,014	0,038	0,20
17	Alimentação	100	9000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			9,80	53,91	21,76	0,019	0,82	0,013	0,054	0,025	0,130	0,67
	Rejeito			90,20	4,04	92,40	0,007	0,50	0,005	0,006	0,016	0,047	0,30
18	Alimentação	150	2000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			1,24	39,49	41,66	0,012	0,34	0,014	0,029	0,040	0,058	0,77
	Rejeito			98,76	7,73	88,58	0,004	0,41	0,005	0,008	0,014	0,034	0,23
19	Alimentação	150	3000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			2,58	45,65	33,73	0,011	0,34	0,015	0,041	0,024	0,004	0,54
	Rejeito			97,42	7,62	87,60	0,006	0,46	0,017	0,011	0,013	0,038	0,33
20	Alimentação	150	4000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			2,99	48,48	29,23	0,010	0,28	0,016	0,040	0,019	0,017	0,50
	Rejeito			97,01	6,57	89,89	0,003	0,46	0,005	0,008	0,017	0,034	0,21
21	Alimentação	150	5000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			5,04	52,96	23,40	0,013	0,37	0,017	0,048	0,018	0,047	0,49
	Rejeito			94,96	5,67	90,65	0,005	0,36	0,005	0,006	0,015	0,021	0,27
22	Alimentação	150	6000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			6,49	53,47	22,88	0,011	0,43	0,015	0,051	0,015	0,017	0,36
	Rejeito			93,51	5,04	91,86	0,005	0,42	0,004	0,005	0,017	0,047	0,23
23	Alimentação	150	7000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			8,04	53,62	23,01	0,015	0,55	0,015	0,053	0,016	0,068	0,47
	Rejeito			91,96	4,92	91,81	0,006	0,50	0,004	0,007	0,026	0,038	0,20
24	Alimentação	150	8000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			8,71	53,62	22,85	0,015	0,58	0,016	0,052	0,016	0,064	0,46
	Rejeito			91,29	4,13	93,19	0,004	0,41	0,004	0,004	0,017	0,030	0,23
25	Alimentação	150	9000	100,00	8,90	86,37	0,028	0,86	0,001	0,001	0,012	0,158	0,51
	Concentrado			8,97	53,53	22,51	0,016	0,64	0,015	0,054	0,020	0,118	0,51
	Rejeito			91,03	3,75	93,48	0,003	0,47	0,004	0,005	0,015	0,021	0,18

9.5. Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones rougher de Brucutu (Teste 01 a 12).

Teste	Fluxo	Água Lavagem mL/seg	Campo (Gauss)	Recup. Mássica (%)	Análise Química Global (%)								
					Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
01	Alimentação	50	2000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			1,90	66,56	4,30	0,0110	0,21	0,018	0,051	0,022	0,001	0,89
	Rejeito			98,10	56,50	18,59	0,0140	0,35	0,013	0,038	0,010	0,006	0,85
02	Alimentação	50	3000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			4,01	67,61	2,57	0,0120	0,17	0,017	0,049	0,016	0,001	0,90
	Rejeito			95,99	56,68	18,47	0,0140	0,34	0,013	0,038	0,009	0,010	0,84
03	Alimentação	50	4000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			8,16	69,27	0,87	0,0100	0,16	0,016	0,053	0,014	0,001	0,46
	Rejeito			91,84	55,66	19,12	0,0140	0,34	0,014	0,036	0,009	0,007	0,86
04	Alimentação	50	5000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			16,12	68,96	0,53	0,0090	0,16	0,016	0,052	0,011	0,001	0,39
	Rejeito			83,88	54,46	21,22	0,0130	0,35	0,014	0,036	0,011	0,004	0,82
05	Alimentação	50	6000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			25,21	69,55	0,46	0,0100	0,18	0,015	0,052	0,011	0,001	0,43
	Rejeito			74,79	52,71	23,69	0,0150	0,40	0,014	0,036	0,011	0,010	0,93
06	Alimentação	50	7000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			35,26	68,91	0,67	0,0140	0,31	0,016	0,051	0,019	0,001	0,56
	Rejeito			64,74	49,39	28,06	0,0140	0,39	0,011	0,031	0,008	0,008	0,91
07	Alimentação	50	8000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			50,79	69,58	0,33	0,0120	0,24	0,016	0,051	0,012	0,001	0,63
	Rejeito			49,21	43,92	36,07	0,0150	0,43	0,011	0,027	0,008	0,023	0,97
08	Alimentação	50	9000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			63,97	68,63	0,42	0,0120	0,25	0,017	0,050	0,012	0,001	0,70
	Rejeito			36,03	34,97	48,92	0,0150	0,46	0,010	0,020	0,009	0,030	1,05
09	Alimentação	50	12600	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			73,16	68,65	1,54	0,0140	0,26	0,016	0,048	0,001	0,001	0,73
	Rejeito			26,84	29,30	57,75	0,0150	0,35	0,009	0,023	0,001	0,018	0,84
10	Alimentação	100	2000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			3,26	65,66	4,77	0,0110	0,16	0,019	0,048	0,007	0,001	0,59
	Rejeito			96,74	56,20	18,81	0,0120	0,38	0,013	0,038	0,016	0,025	0,78
11	Alimentação	100	3000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			6,21	67,86	2,40	0,0080	0,14	0,017	0,048	0,005	0,001	0,45
	Rejeito			93,79	55,66	19,02	0,0120	0,36	0,015	0,038	0,003	0,001	0,88
12	Alimentação	100	4000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			10,76	68,52	1,79	0,0080	0,18	0,017	0,049	0,006	0,001	0,38
	Rejeito			89,24	55,69	19,60	0,0120	0,38	0,015	0,038	0,009	0,001	0,84

9.6. Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones rougher de Brucutu (Teste 13 a 25).

Teste	Fluxo	Água Lavagem mL/seg	Campo (Gauss)	Recup. Mássica (%)	Análise Química Global (%)								
					Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
13	Alimentação	100	5000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			18,85	69,07	1,32	0,0090	0,19	0,016	0,047	0,003	0,001	0,41
	Rejeito			81,15	53,83	21,26	0,0110	0,35	0,015	0,037	0,008	0,001	0,92
14	Alimentação	100	6000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			28,48	68,93	1,04	0,0080	0,17	0,017	0,048	0,004	0,001	0,44
	Rejeito			71,52	51,27	24,27	0,0130	0,37	0,015	0,036	0,042	0,001	0,97
15	Alimentação	100	7000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			37,21	68,98	1,05	0,0100	0,22	0,017	0,049	0,005	0,001	0,54
	Rejeito			62,79	49,08	27,83	0,0120	0,37	0,015	0,034	0,011	0,001	0,95
16	Alimentação	100	8000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			43,17	68,87	1,00	0,0100	0,24	0,017	0,050	0,005	0,001	0,62
	Rejeito			56,83	46,77	32,29	0,0120	0,45	0,012	0,030	0,037	0,043	0,96
17	Alimentação	100	9000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			56,17	69,01	0,90	0,0110	0,21	0,016	0,049	0,004	0,001	0,64
	Rejeito			43,83	40,04	42,10	0,0120	0,44	0,010	0,024	0,010	0,039	1,00
18	Alimentação	150	2000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			2,61	66,66	4,12	0,0100	0,16	0,018	0,045	0,010	0,001	0,61
	Rejeito			97,39	57,14	17,47	0,0120	0,31	0,015	0,039	0,006	0,015	0,77
19	Alimentação	150	3000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			7,53	68,58	2,07	0,0070	0,14	0,017	0,048	0,006	0,001	0,33
	Rejeito			92,47	54,53	20,50	0,0110	0,37	0,013	0,036	0,010	0,023	0,91
20	Alimentação	150	4000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			10,52	67,72	1,68	0,0050	0,17	0,016	0,049	0,011	0,001	0,31
	Rejeito			89,48	55,63	19,64	0,0120	0,33	0,014	0,041	0,006	0,010	0,84
21	Alimentação	150	5000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			19,54	69,12	1,40	0,0090	0,23	0,016	0,050	0,007	0,001	0,32
	Rejeito			80,46	53,55	22,43	0,0120	0,36	0,013	0,035	0,008	0,022	0,91
22	Alimentação	150	6000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			22,89	69,00	1,00	0,0080	0,19	0,017	0,050	0,004	0,001	0,45
	Rejeito			77,11	51,50	25,54	0,0150	0,56	0,013	0,033	0,021	0,036	0,96
23	Alimentação	150	7000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			36,09	69,54	0,38	0,0080	0,22	0,016	0,049	0,016	0,001	0,56
	Rejeito			63,91	49,34	28,71	0,0110	0,40	0,013	0,032	0,010	0,023	0,96
24	Alimentação	150	8000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			46,40	69,65	0,42	0,0080	0,23	0,017	0,051	0,013	0,002	0,55
	Rejeito			53,60	46,59	32,37	0,0140	0,56	0,012	0,029	0,018	0,049	0,92
25	Alimentação	150	9000	100,00	56,00	18,02	0,0110	0,39	0,023	0,036	0,015	0,018	0,87
	Concentrado			53,25	69,43	0,41	0,0100	0,24	0,017	0,050	0,013	0,007	0,64
	Rejeito			46,75	42,41	38,61	0,0150	0,59	0,011	0,027	0,017	0,050	1,00

9.7. Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones cleaner de Brucutu (Teste 01 a 12).

Teste	Fluxo	Água Lavagem mL/seg	Campo (Gauss)	Recup. Mássica (%)	Análise Química Global (%)								
					Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
01	Alimentação	50	2000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			4,44	66,62	3,37	0,035	0,43	0,070	0,077	0,010	0,011	1,15
	Rejeito			95,56	60,66	11,51	0,028	0,52	0,019	0,061	0,022	0,008	0,92
02	Alimentação	50	3000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			10,98	68,42	1,49	0,017	0,27	0,030	0,063	0,018	0,001	0,61
	Rejeito			89,02	60,38	12,24	0,018	0,46	0,018	0,062	0,012	0,008	0,98
03	Alimentação	50	4000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			15,26	68,37	1,43	0,013	0,25	0,021	0,070	0,007	0,001	0,49
	Rejeito			84,74	60,38	12,24	0,018	0,46	0,018	0,062	0,012	0,008	0,98
04	Alimentação	50	5000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			26,97	69,41	0,71	0,011	0,21	0,021	0,064	0,013	0,001	0,53
	Rejeito			73,03	58,10	15,03	0,020	0,51	0,018	0,058	0,012	0,008	1,10
05	Alimentação	50	6000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			38,39	68,44	0,73	0,012	0,26	0,017	0,070	0,006	0,001	0,58
	Rejeito			61,61	56,46	17,91	0,021	0,55	0,018	0,058	0,011	0,009	1,23
06	Alimentação	50	7000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			49,01	68,42	0,62	0,011	0,27	0,016	0,070	0,006	0,001	0,56
	Rejeito			50,99	53,90	20,61	0,023	0,59	0,018	0,055	0,013	0,008	1,23
07	Alimentação	50	8000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			59,10	68,69	1,37	0,013	0,30	0,019	0,066	0,011	0,003	0,73
	Rejeito			40,90	51,35	25,59	0,021	0,55	0,015	0,052	0,011	0,019	1,19
08	Alimentação	50	9000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			55,51	68,44	1,23	0,016	0,35	0,019	0,066	0,012	0,001	0,79
	Rejeito			44,49	51,97	24,25	0,021	0,55	0,016	0,049	0,010	0,012	1,14
09	Alimentação	100	2000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			2,82	67,49	2,61	0,013	0,22	0,020	0,060	0,019	0,001	0,72
	Rejeito			97,18	61,34	10,50	0,018	0,44	0,019	0,063	0,012	0,001	0,92
10	Alimentação	100	3000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			6,22	69,00	1,19	0,012	0,20	0,019	0,063	0,015	0,001	0,55
	Rejeito			93,78	60,91	11,34	0,019	0,48	0,016	0,058	0,011	0,004	0,93
11	Alimentação	100	4000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			8,33	69,40	0,80	0,012	0,18	0,019	0,064	0,018	0,001	0,42
	Rejeito			91,67	60,05	11,91	0,017	0,43	0,017	0,059	0,012	0,001	1,02
12	Alimentação	100	5000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			15,92	69,54	0,52	0,011	0,18	0,019	0,066	0,015	0,001	0,47
	Rejeito			84,08	60,41	12,94	0,018	0,46	0,019	0,063	0,012	0,005	1,01

9.8. Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones cleaner de Brucutu (Teste 13 a 25).

Teste	Fluxo	Água Lavagem mL/seg	Campo (Gauss)	Recup. Mássica (%)	Análise Química Global (%)								
					Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
13	Alimentação	100	6000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			23,94	69,58	0,39	0,012	0,21	0,018	0,066	0,015	0,001	0,45
	Rejeito			76,06	59,07	14,40	0,021	0,56	0,018	0,063	0,016	0,014	1,06
14	Alimentação	100	7000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			38,04	69,02	0,44	0,013	0,26	0,019	0,070	0,014	0,001	0,52
	Rejeito			61,96	56,25	17,57	0,023	0,67	0,018	0,059	0,026	0,021	1,42
15	Alimentação	100	8000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			47,41	69,45	0,36	0,014	0,27	0,017	0,067	0,012	0,001	0,66
	Rejeito			52,59	54,03	21,21	0,022	0,61	0,018	0,057	0,014	0,011	1,42
16	Alimentação	100	9000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			58,11	69,13	0,75	0,019	0,43	0,017	0,067	0,021	0,006	0,73
	Rejeito			41,89	50,03	26,92	0,021	0,58	0,015	0,053	0,018	0,012	1,48
17	Alimentação	150	2000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			2,82	68,29	1,90	0,016	0,27	0,024	0,063	0,013	0,001	0,80
	Rejeito			97,18	61,20	11,25	0,018	0,46	0,017	0,063	0,015	0,004	1,15
18	Alimentação	150	3000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			6,31	68,75	1,09	0,013	0,21	0,020	0,062	0,011	0,001	0,60
	Rejeito			93,69	59,62	12,68	0,020	0,63	0,019	0,058	0,014	0,006	1,21
19	Alimentação	150	4000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			8,91	69,25	0,75	0,013	0,20	0,019	0,065	0,015	0,001	0,49
	Rejeito			91,09	59,98	12,38	0,019	0,44	0,016	0,060	0,009	0,005	1,04
20	Alimentação	150	5000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			18,64	69,62	0,55	0,012	0,23	0,018	0,064	0,014	0,001	0,41
	Rejeito			81,36	60,05	13,21	0,020	0,46	0,019	0,060	0,008	0,004	1,07
21	Alimentação	150	6000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			25,71	69,48	0,47	0,011	0,21	0,018	0,067	0,027	0,001	0,55
	Rejeito			74,29	58,70	14,93	0,021	0,51	0,018	0,059	0,009	0,001	1,16
22	Alimentação	150	7000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			41,86	68,89	0,95	0,014	0,32	0,019	0,067	0,024	0,009	0,69
	Rejeito			58,14	55,95	18,10	0,021	0,52	0,017	0,056	0,011	0,001	1,22
23	Alimentação	150	8000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			49,66	69,18	0,35	0,014	0,26	0,018	0,066	0,013	0,001	0,78
	Rejeito			50,34	53,51	22,44	0,022	0,58	0,018	0,053	0,013	0,018	1,24
24	Alimentação	150	9000	100,00	60,68	11,78	0,019	0,41	0,019	0,061	0,013	0,035	1,02
	Concentrado			59,13	68,45	1,26	0,016	0,36	0,019	0,065	0,021	0,003	0,86
	Rejeito			40,87	48,53	28,95	0,024	0,63	0,016	0,051	0,010	0,011	1,30

9.9. Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones rougher do Pico (Teste 01 a 12).

Teste	Fluxo	Água Lavagem mL/seg	Campo (Gauss)	Recup. Mássica (%)	Análise Química Global (%)								
					Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
01	Alimentação	50	2000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			15,55	67,09	3,30	0,030	0,32	0,047	0,096	0,007	0,001	0,79
	Rejeito			84,45	56,43	16,54	0,050	0,85	0,341	0,123	0,015	0,025	1,87
02	Alimentação	50	3000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			27,06	66,79	2,69	0,028	0,33	0,057	0,106	0,008	0,001	0,90
	Rejeito			72,94	54,96	18,64	0,053	0,89	0,395	0,122	0,014	0,030	1,97
03	Alimentação	50	4000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			31,48	67,26	3,13	0,034	0,39	0,072	0,113	0,011	0,017	0,96
	Rejeito			68,52	53,82	19,81	0,056	0,95	0,425	0,121	0,014	0,030	2,07
04	Alimentação	50	5000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			41,88	66,45	3,15	0,034	0,38	0,088	0,113	0,010	0,001	1,06
	Rejeito			58,12	51,58	22,23	0,056	1,01	0,442	0,116	0,015	0,032	2,12
05	Alimentação	50	6000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			62,62	66,76	3,13	0,038	0,51	0,131	0,127	0,012	0,009	1,20
	Rejeito			37,38	43,89	32,96	0,062	1,22	0,600	0,111	0,012	0,042	2,45
06	Alimentação	50	7000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			63,72	65,51	4,14	0,043	0,59	0,177	0,119	0,014	0,021	1,39
	Rejeito			36,28	42,83	33,77	0,055	1,06	0,470	0,105	0,013	0,040	2,13
07	Alimentação	50	8000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			68,80	64,98	4,70	0,051	0,76	0,221	0,120	0,018	0,037	1,54
	Rejeito			31,20	41,48	37,16	0,051	1,14	0,435	0,106	0,012	0,044	1,99
08	Alimentação	50	9000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			67,99	64,91	4,45	0,044	0,60	0,233	0,118	0,008	0,009	1,56
	Rejeito			32,01	42,94	35,18	0,051	1,11	0,391	0,102	0,016	0,041	2,14
09	Alimentação	50	12000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			67,97	64,40	4,10	0,048	0,93	0,100	0,078	0,021	0,053	2,44
	Rejeito			32,03	43,60	35,20	0,047	0,97	0,342	0,099	0,002	0,034	1,64
10	Alimentação	100	2000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			11,70	67,45	2,93	0,035	0,46	0,059	0,094	0,018	0,015	0,84
	Rejeito			88,30	56,55	16,02	0,053	0,88	0,350	0,125	0,018	0,026	1,72
11	Alimentação	100	3000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			21,89	68,11	1,99	0,031	0,36	0,059	0,113	0,014	0,010	0,87
	Rejeito			78,11	55,21	17,87	0,057	0,96	0,380	0,124	0,017	0,028	1,92
12	Alimentação	100	4000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			27,85	65,96	3,04	0,042	0,53	0,081	0,178	0,020	0,062	0,87
	Rejeito			72,15	54,38	18,80	0,057	0,99	0,425	0,125	0,017	0,026	2,07

9.10. Resultados dos testes de bancada com a amostra de alimentação do Jones rougher do Pico (Teste 13 a 25).

Teste	Fluxo	Água Lavagem mL/seg	Campo (Gauss)	Recup. Mássica (%)	Análise Química Global (%)								
					Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
13	Alimentação	100	5000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			38,30	66,57	2,53	0,032	0,41	0,077	0,112	0,010	0,001	0,96
	Rejeito			61,70	52,17	21,97	0,059	1,01	0,479	0,121	0,017	0,033	2,27
14	Alimentação	100	6000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			48,24	66,63	2,46	0,037	0,40	0,093	0,123	0,024	0,008	0,96
	Rejeito			51,76	49,22	26,06	0,061	1,10	0,498	0,119	0,017	0,041	2,24
15	Alimentação	100	7000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			60,83	66,48	2,76	0,039	0,45	0,140	0,124	0,019	0,005	1,20
	Rejeito			39,17	43,98	33,21	0,063	1,22	0,573	0,111	0,019	0,051	2,32
16	Alimentação	100	8000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			67,54	66,51	2,99	0,044	0,53	0,188	0,125	0,021	0,016	1,36
	Rejeito			32,46	39,54	39,27	0,062	1,28	0,518	0,105	0,016	0,057	2,19
17	Alimentação	100	9000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			70,44	65,59	3,53	0,048	0,61	0,251	0,132	0,021	0,020	1,45
	Rejeito			29,56	39,88	39,99	0,051	1,16	0,381	0,099	0,014	0,051	1,86
18	Alimentação	150	2000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			10,96	67,64	1,97	0,032	0,34	0,056	0,100	0,019	0,016	0,65
	Rejeito			89,04	57,15	15,74	0,050	0,84	0,332	0,125	0,016	0,034	1,75
19	Alimentação	150	3000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			20,14	67,60	1,73	0,029	0,32	0,052	0,109	0,019	0,003	0,74
	Rejeito			79,86	55,82	17,56	0,056	0,93	0,384	0,124	0,017	0,038	1,86
20	Alimentação	150	4000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			26,53	67,46	1,84	0,032	0,39	0,054	0,113	0,022	0,021	0,73
	Rejeito			73,47	54,33	18,01	0,056	0,96	0,424	0,122	0,015	0,029	1,97
21	Alimentação	150	5000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			37,95	67,42	2,00	0,031	0,34	0,069	0,119	0,021	0,008	0,85
	Rejeito			62,05	51,99	21,75	0,059	1,02	0,443	0,118	0,017	0,031	2,16
22	Alimentação	150	6000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			47,25	66,50	2,48	0,036	0,42	0,095	0,122	0,026	0,007	0,99
	Rejeito			52,75	49,77	25,47	0,061	1,12	0,518	0,123	0,026	0,042	2,20
23	Alimentação	150	7000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			56,70	66,29	3,02	0,043	0,55	0,153	0,121	0,024	0,023	1,14
	Rejeito			43,30	44,78	30,49	0,063	1,27	0,548	0,120	0,019	0,050	2,35
24	Alimentação	150	8000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			65,83	66,04	2,93	0,043	0,53	0,187	0,132	0,019	0,010	1,26
	Rejeito			34,17	41,65	36,41	0,063	1,23	0,569	0,104	0,015	0,050	2,18
25	Alimentação	150	9000	100,00	58,28	14,37	0,053	0,96	0,250	0,016	0,001	0,013	1,72
	Concentrado			71,12	65,65	3,22	0,048	0,61	0,259	0,129	0,020	0,022	1,47
	Rejeito			28,88	37,88	40,85	0,055	1,22	0,442	0,094	0,017	0,049	2,03