

CEERMIN - Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

Estudo de Desempenho de uma Rota de Processo de Concentração Magnética

Aluno: Maurício Fillipe da Silva Lima
Orientadora: Prof^a. Rísia Magriotis Papini

Junho 2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

à Deus pelas bênçãos concedidas na minha carreira;

aos meus pais Nádia e Adilson, minha irmã Ana Amélia e a minha namorada Rafaela, pelo amor, carinho, incentivo e compreensão;

aos meus amigos de profissão, ao Abdo pelas orientações e ao Dartagnan pela confiança;

aos professores e a minha orientadora Rísia, por subsidiar o meu desenvolvimento.

Muito obrigado.

RESUMO

Atualmente, com a escassez de minérios granulados hematíticos, as empresas de mineração estão cada vez mais inseridas no cenário de minérios de baixo a alto teor de ferro e granulometria superfina. Eventualmente alguns minérios, com características físico-químicas específicas, podem conter partículas do mineral de interesse liberadas ao ponto de não exigirem processos de cominuição e, posteriormente, de concentração por flotação, como usualmente é definida a rota de processo ótima. Para estes tipos de minérios, as etapas de classificação granulométrica e concentração em espirais e/ou concentradores magnéticos podem ser suficientes para se obter produtos que atendem às especificações de mercado. Ao longo do desenvolvimento da jazida, litologias e características diversas podem vir a compor o ROM em diferentes proporções. Logo, é imprescindível o conhecimento das características da jazida durante todo o sequenciamento da lavra, pois, haverá comportamentos distintos dependendo do minério dentro de uma instalação de tratamento. Assim, este trabalho propõe realizar um estudo de avaliação em uma rota de processo de concentração magnética, objetivando nos fluxos de alimentação, concentrado e rejeito, descrever a composição mineralógica e mensurar o grau de liberação, granulometria e química, além da recuperação mássica e metalúrgica, e assim, comparar os diversos comportamentos dos minérios na instalação de tratamento, em função da variação mineralógica do ROM. Observou-se nos estudos de caracterização que, a alimentação do circuito de concentração magnética estudado, apresenta alto grau de liberação, oriundo da própria característica do minério. As granulometrias das amostras dos fluxos de alimentação, concentrado e rejeito apresentam praticamente o mesmo comportamento quando comparadas entre si. Quanto à mineralogia, apesar da variação em termos de tipologia e seu percentual de participação na composição do ROM, não há desaparecimento ou variação brusca dos minerais presentes em todos os fluxos analisados, exceto para a goethita terrosa praticamente nula no fluxo de concentrado. A granulométrica permitiu identificar que tanto para as amostras de alimentação, quanto para as de concentrado, há um enriquecimento do teor de ferro a medida que decresce a faixa granulométrica. O circuito de concentração magnética avaliado, apresenta eficiência condicionada a dois fatores principais: mineralogia e granulometria da alimentação. Observa-se que não ocorre concentração para a goethita terrosa pelo processo magnético, enquanto que a goethita botrioidal apresenta-se em baixa concentração. Além disso, cerca de 20% da granulometria de alimentação encontra-se abaixo do limite crítico de trabalho do equipamento de concentração magnética utilizado neste estudo. Assim sendo, este trabalho envolvendo

estudos de caracterização em rota de processo de concentração magnética permitiu identificar os óxidos e hidróxidos de ferro presentes nos fluxos de alimentação, concentrado e rejeito, bem como conhecer o grau de liberação, distribuição granulométrica e composição química, mensurar o desempenho mássico e metalúrgico do circuito, identificar principais ganhos e perdas de eficiência, além de apresentar oportunidades de melhorias no processo e orientar para estudos futuros de caracterização.

.

ABSTRACT

Currently, the shortage of hematite lump ores, mining companies are increasingly inserted in the lower and high iron ore scenario and superfine grain size. Eventually some ores with specific physico-chemical characteristics, can contain mineral particles of interest released to the extent they do not require comminution process and then concentration by flotation, is usually defined as an optimal process route. For these types of ores, steps size classification and concentration in spirals and / or magnetic concentrators may be sufficient to obtain products that meet market specifications. Throughout the development of the deposit, lithology and several features are likely to make up the ROM in different proportions. Therefore, it is imperative to know the reservoir's characteristics throughout the sequencing of mining, because there will be different behaviors depending on the ore into a treatment works. This work proposes to carry out an assessment in a magnetic concentration process route, aiming the feed streams, concentrate and tailings, describe the mineralogical composition and measure the degree of release, particle size and chemistry, plus the mass and metallurgical recovery and thus compare the behavior of different minerals at the treatment works, due to the mineralogical changes ROM. It was observed in the characterization studies that the power of the magnetic circuit concentration studied, has a high degree of release, arising from the characteristic of the ore. The particle size of the samples of feed streams, concentrate and tailings have almost the same behavior when compared to each other. As for mineralogy, despite the variation in type and its percentage of participation in the composition of ROM, there's no disappearance or sudden change of minerals present in all streams analyzed, except for the almost zero earthy goethite in the concentrate stream. The chemical analysis identified that both the feed samples and for the concentrate, there is an enrichment of iron content decreases as the particle size range. The magnetic concentration circuit rated, has conditioned efficiency to two main factors: mineralogy and grain size of the feed. It is observed that there occurs concentration of earthy goethite by the magnetic process while botrioidal goethite present in low concentration. Furthermore, about 20% of the feed particle size is below the critical limit of the working magnetic concentration equipment used in this study. Thus, this study involving characterization studies on magnetic concentration process route identified the oxides and hydroxides of iron present in the feed streams, concentrate and waste, as well as knowing the degree of release, size distribution and chemical composition, measure the mass and metallurgical performance circuit, identify key profit and loss of efficiency, and

present opportunities for improvement in the process and guide for future characterization studies.

DEFINIÇÕES TÉCNICAS

ROM: *Run of Mine*- Minério proveniente da mina que será direcionado para a alimentação da Instalação de Tratamento.

Polpa de minério: Mistura de sólidos e água.

Percentual de sólidos em massa: É a razão, expressa em percentagem, entre massa de sólidos presentes na polpa e a massa desta polpa.

Percentual de sólidos em volume: É a razão, expressa em percentagem, entre volume de sólidos presentes na polpa e o volume desta polpa.

Densidade de polpa: É a razão entre a massa de uma polpa e seu volume.

Teor: É a razão, expressa em percentagem, entre a massa da substância de interesse, contida em uma amostra, e a massa desta amostra.

Recuperação em Massa: Calculada em etapas ou na rota de processo global , é a razão expressa em percentagem entre a massa de um fluxo de concentrado em relação ao total de massa do fluxo de alimentação.

Recuperação Metalúrgica ou Metálica: Calculada em fases ou na rota de processo global , é a razão expressa em percentagem entre a massa de um metal contida no concentrado em relação a massa deste metal contida na alimentação.

Concentração: Processo de separação dos minerais úteis dos sem valor. As operações de concentração baseiam-se nas diferenças de propriedades dos minerais para separá-los, entre elas: densidade, susceptibilidade magnética, condutividade elétrica, propriedades de superfície, radioatividade, cor, brilho, forma.

Concentrado: Fluxo proveniente da etapa de concentração que contém a maior parte dos minerais e/ou metais de interesse.

Rejeito: Fluxo proveniente da etapa de concentração que contém a menor parte dos minerais e/ou metais de interesse.

Etapa de Concentração Rougher: Etapa de desbaste da concentração mineral, onde é feita a primeira etapa de concentração das partículas, cujo o principal compromisso é de obter uma alta recuperação dos minerais e/ou alta recuperação metálica.

Etapa de Concentração Cleaner: Etapa de concentração onde o principal compromisso é a “limpeza” do concentrado Rougher, gerando assim os produtos finais.

Etapa de Concentração Scavenger: Etapa de concentração onde o principal compromisso é recuperar, ao máximo, os minerais e/ou metais contidos no rejeito das etapas Rougher ou Cleaner.

LIMS: Do inglês “Low Intesity Magnetic Separation”, LIMS é um equipamento que proporciona uma separação magnética utilizando baixa intensidade de campo magnético, via circuito a úmido ou a seco.

WDRE: Do inglês “Wet Drum Rares Earths”, WDRE é um equipamento que proporciona uma separação magnética, via circuitos a úmido, utilizando campo magnético gerado por tambores confeccionados com imãs de terras raras.

WHIMS: Do inglês “Wet High Intensity Magnetic Separation” WHIMS é um equipamento que proporciona uma separação magnética utilizando campo magnético alta intensidade, via circuito a úmido.

SUMÁRIO

1 – Introdução	1
2 - Objetivo.....	2
3 – Revisão bibliográfica.....	3
3.1 - Aspectos gerais.....	3
3.2 - Caracterização dos depósitos de minério de ferro.....	4
3.3 - Caracterização dos minerais de ferro	5
3.3.1 - Magnetita	6
3.3.2 - Hematita	6
3.3.3 - Goethita	7
3.4 - Minerais de ganga	8
3.5 - Caracterização do minério de ferro do quadrilátero ferrífero (QF).....	8
3.6 - Caracterização da geologia local.....	11
3.6.1 - Características de cada litologia.....	13
3.6.1.1 - Hematita ou minério hematítico	13
3.6.1.2 - Itabirito	13
3.6.1.3 - Outras litologias presentes.....	14
3.7 - Concentração magnética	15
3.7.1 - Magnetismo.....	15
3.7.2 - Grandezas e unidades utilizadas	16
3.7.3 - Geração do campo magnético	18
3.7.4 - Processo de concentração magnética	18
3.8 - Caracterização de minérios	22
4 - Metodologia	23
4.1 - Obtenção, identificação e preparação das amostras	23

4.2 - Caracterização das amostras.....	24
4.2.1 - Caracterização mineralógica	24
4.2.2 - Caracterização granulométrica.....	24
4.2.3 - Determinação do grau de liberação (método Gaudin)	25
4.2.4 - Análise química.....	25
4.2.5 - Pesagem e secagem	26
5 - Resultados e discussão	27
5.1 - Caracterização mineralógica das amostras.....	27
5.1.1 - Caracterização mineralógica das amostras de alimentação	27
5.1.2 - Caracterização mineralógica das amostras de concentrado	34
5.1.3 - Caracterização mineralógica das amostras de rejeito.....	41
5.2 - Caracterização granulométrica das amostras	48
5.2.1 - Caracterização granulométrica das amostras de alimentação	48
5.2.2 - Caracterização granulométrica das amostras de concentrado	49
5.2.3 - Caracterização granulométrica das amostras de rejeito	50
5.3 - Grau de liberação das amostras	51
5.3.1 - Grau de liberação das amostras de alimentação.....	51
5.3.2 - Grau de liberação das amostras de concentrado	52
5.3.3 - Grau de liberação das amostras de rejeito.....	53
5.4 - Caracterização química das amostras.....	54
5.4.1 - Caracterização granuloquímica das amostras de alimentação	54
5.4.2 - Caracterização granuloquímica das amostras de concentrado	55
5.4.3 - Caracterização granuloquímica das amostras de rejeito	56
5.5 - Recuperação mássica e metalúrgica.....	58
6 - Conclusões	60
7 - Sugestão para trabalhos futuros.....	63

8 - Referências bibliográficas	64
9 - Anexos.....	67
9.1 - Rota de processo da concentração magnética estudada	67
9.2 - Análise granulométrica alimentação	67
9.3 - Análise granulométrica concentrado	68
9.4 - Análise granulométrica rejeito	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 - Fotomicrografia de Cristais Martizados de Magnetita	6
Figura 3. 2 - Amostra de Mão e Fotomicrografia de Cristais de Hematita	7
Figura 3. 3 - Fotomicrografia de Cristais de Goethita.....	7
Figura 3. 4 - Amostra de Mão de Quartzo.....	8
Figura 3. 5 - Mapa do Quadrilátero Ferrífero (TAKEHARA, 2013)	9
Figura 3. 6 - Coluna Estratigráfica Esquemática do QF (modificado de DORR, 1959).....	11
Figura 3. 7 - Imã Permanente	15
Figura 3. 8 - Linhas de Força do Campo Magnético (RODRIGUES et al., 2008).....	16
Figura 3. 9 - Gráfico da Intensidade de Magnétização x Campo Magnético (LUZ, 2004).....	17
Figura 3. 10 - Princípio Esquemático de Concentração Magnética do tipo Tambor (RODRIGUES et al., 2008).....	20
Figura 3. 11 - Princípio Esquemático de Concentração Magnética do tipo Carrossel (RODRIGUES et al., 2008).....	21
Figura 5. 1 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Alimentação - 26/11/14	28
Figura 5. 2 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Alimentação - 26/11/14	28
Figura 5. 3 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Alimentação - 04/12/14	30
Figura 5. 4 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Alimentação - 04/12/14	30
Figura 5. 5 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Alimentação - 09/12/14	32
Figura 5. 6 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Alimentação - 09/12/14	32
Figura 5. 7 - Composição Mineralógica Global das Amostras de Alimentação	33
Figura 5. 8 - Composição Mineralógica dos Óxidos de Ferro das Amostras de Alimentação.	34
Figura 5. 9 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Concentrado - 26/11/14	35
Figura 5. 10 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Concentrado - 26/11/14	35
Figura 5. 11 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Concentrado - 04/12/14	37
Figura 5. 12 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Concentrado - 04/12/14	37
Figura 5. 13 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Concentrado - 09/12/14	39
Figura 5. 14 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Concentrado - 09/12/14	39
Figura 5. 15 - Composição Mineralógica Global das Amostras de Concentrado	40
Figura 5. 16 - Composição Mineralógica dos Óxidos de Ferro das Amostras de Concentrado	40
Figura 5. 17 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Rejeito - 26/11/14.....	42

Figura 5. 18 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Rejeito - 26/11/14.....	42
Figura 5. 19 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Rejeito - 04/12/14.....	44
Figura 5. 20 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Rejeito - 04/12/14.....	44
Figura 5. 21 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Rejeito - 09/12/14.....	46
Figura 5. 22 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Rejeito - 09/12/14.....	46
Figura 5. 23 - Composição Mineralógica Global das Amostras de Rejeito	47
Figura 5. 24 - Composição Mineralógica dos Óxidos de Ferro das Amostras de Rejeito.....	48
Figura 5. 25 - Curva Granulométrica Completa da Alimentação 1, 2 e 3.....	49
Figura 5. 26 - Curva Granulométrica Completa do Concentrado 1, 2 e 3.....	50
Figura 5. 27 - Curva Granulométrica Completa do Rejeito 1, 2 e 3.....	51
Figura 5. 28 - Recuperação Mássica Global e por Faixa.....	58
Figura 5. 29 - Recuperação Metalúrgica Global e por Faixa.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela III. 1 - Principais Feições das Formações Ferríferas (TAKEHARA, 2013).....	4
Tabela III. 2 - Principais Minerais de Ferro e sua Classe.....	5
Tabela III. 3 - Composição Mineralógica dos Diferentes Tipos de Minério do QF.....	10
Tabela III. 4 - Litologias da Jazida	12
Tabela III. 5 - Grandezas e Unidades Magnéticas (PAPINI, 2014)	17
Tabela V. 1 - Mineralogia da Amostra de Alimentação - 26/11/14	27
Tabela V. 2 - Mineralogia da Amostra de Alimentação - 04/12/14	29
Tabela V. 3 - Mineralogia da Amostra de Alimentação - 09/12/14	31
Tabela V. 4 - Mineralogia da Amostra de Concentrado - 26/11/14	34
Tabela V. 5 - Mineralogia da Amostra de Concentrado - 04/12/14	36
Tabela V. 6 - Mineralogia da Amostra de Concentrado - 09/12/14	38
Tabela V. 7 - Mineralogia da Amostra de Rejeito - 26/11/14	41
Tabela V. 8 - Mineralogia da Amostra de Rejeito - 04/12/14	43
Tabela V. 9 - Mineralogia da Amostra de Rejeito - 09/12/14	45
Tabela V. 10 - Grau de Liberação Amostras de Alimentação.....	52
Tabela V. 11 - Grau de Liberação Amostras de Concentrado.....	52
Tabela V. 12 - Grau de Liberação Amostras de Rejeito.....	53
Tabela V. 13 - Análise Granuloquímica Alimentação - Amostra 1 - 26/11/14.....	54
Tabela V. 14 - Análise Granuloquímica Alimentação - Amostra 2- 04/12/14.....	54
Tabela V. 15 - Análise Granuloquímica Alimentação - Amostra 3 - 09/12/14.....	55
Tabela V. 16 - Análise Granuloquímica Concentrado - Amostra 1 - 26/11/14.....	55
Tabela V. 17 - Análise Granuloquímica Concentrado - Amostra 2 - 04/12/14.....	56
Tabela V. 18 - Análise Granuloquímica Concentrado - Amostra 3 - 09/12/14.....	56
Tabela V. 19 - Análise Granuloquímica Rejeito - Amostra 1 - 26/11/14.....	56
Tabela V. 20 - Análise Granuloquímica Rejeito - Amostra 2 - 04/12/14.....	57
Tabela V. 21 - Análise Granuloquímica Rejeito - Amostra 3 - 09/12/14.....	57
Tabela IX. 1 - Análise Granulométrica Alimentação - Amostras (1, 2 e 3).....	67
Tabela IX. 2 - Análise Granulométrica Concentrado - Amostras (1, 2 e 3).....	68
Tabela IX. 3 - Análise Granulométrica Rejeito - Amostras (1, 2 e 3).....	68

1 – INTRODUÇÃO

A crescente demanda por minério de ferro desde a sua descoberta e utilização no mundo inteiro, provocou a escassez do recurso finito denominado como "minérios granulados hematíticos", que são utilizados diretamente na siderurgia. Este fato forçou o desenvolvimento de métodos de concentração mineral de finos, entre eles a concentração magnética, a fim de produzir produtos para a alimentação de processos de aglomeração, tais como a sinterização e a pelletização.

Entende-se por concentração magnética o método de separação de misturas heterogêneas de componentes sólidos, onde se obtém no concentrado os minerais e/ou metais que são atraídos pelo campo magnético.

A concentração magnética pode ser aplicada dependendo da resposta ao campo magnético, para as espécies mineralógicas e/ou metais individuais, tanto no beneficiamento de minério quanto na remoção de sucatas.

A concentração magnética por tambor é um processo de concentração em um campo de média intensidade (6.000 Gauss). Sua aplicação mais adequada é para partículas de tamanho entre 3,0 mm a 0,100 mm. Em muitos casos, serve como proteção para a concentração magnética que utiliza a tecnologia WHIMS, impedindo entupimento das matrizes quando ocorre grande quantidade de magnetita (mineral ferromagnético).

A concentração magnética por carrossel (WHIMS) tem a função de separar ou concentrar materiais fracamente magnéticos (hematita, limonita, goethita, etc). Sua faixa de atuação compreende minérios com granulometria abaixo de 1,00 mm.

2 - OBJETIVO

Este trabalho propõe realizar um estudo de desempenho em uma rota de processo de Concentração Magnética, objetivando caracterizar nos fluxos de alimentação, concentrado e rejeito, a composição mineralógica, grau de liberação, granulometria e química, além da recuperação mássica e metalúrgica, em função da variação e composição mineralógica do ROM.

.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - Aspectos Gerais

Sabe-se que o minério de ferro é uma das matérias primas de uso mais antigo, e desde a sua descoberta no período Neolítico, tem ampliado seu leque de aplicação (TAKEHARA, 2013).

O Brasil, hoje, em função dos teores de ferro de seus minérios, possui lugar de destaque no cenário mundial, ocupando a 5ª colocação entre os países detentores das maiores quantidades de minério, ou seja, representa 6,4% (21 bilhões de toneladas) das reservas mundiais. As reservas de minério de ferro brasileiras, estão distribuídas nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Pará e demais estados (TAKEHARA, 2013).

Ressalta-se que na produção mundial de minério de ferro, o Brasil já representou cerca de 20% desta fatia, levando-o ao patamar de um dos maiores produtores de minério de ferro do mundo nas últimas décadas.

Apesar do minério de ferro brasileiro entrar no mercado mundial com grande vantagem competitiva quando comparado ao minério de outros países, em razão de seus aspectos geológicos e de exploração, é de extrema importância conhecer bem suas características físicas, químicas e mineralógicas, principalmente no cenário atual.

A baixa expectativa em relação ao desempenho do mercado siderúrgico mundial para os próximos anos, faz com que as perspectivas do mercado de minério de ferro não seja as mais otimistas comparado a década passada. Aliado a isto, os custos em geral na indústria de minério de ferro encontram-se em adequação, principalmente o preço da tonelada de minério.

Sabe-se que a prospecção do minério de ferro depende da correlação entre fatores geológicos, técnicos e econômicos, interligados ao modelo industrial de fabricação de aço (GROSS, 1993 e HUNDERTMARK, 1996). Assim, a exploração dos aspectos relacionados ao tipo de minério de ferro disponível, processo de tratamento mineral (beneficiamento), processamento metalúrgico da matéria prima e infraestrutura regional (sistema de transporte, mão-de-obra e custos), torna-se estratégia fundamental de qualquer empresa mineradora.

3.2 - Caracterização dos Depósitos de Minério de Ferro

Geologicamente os depósitos de minério de ferro podem ser classificados pela sua tipologia principal e distribuição geográfica, sendo:

- Depósitos de minérios de ferro tipo *Banded Iron Formation* - BIFs, que abrangem aqueles depósitos de Formação Ferrífera Bandada (FFB) de grande porte e gerados em ambiente marinho;
- Depósitos relacionados às atividades magmáticas e/ou vulcano-sedimentares;
- Depósitos formados por metamorfismo de contato;
- Depósitos sedimentares oolíticos e pisolíticos; e
- Depósitos resultantes de alteração e acúmulo em superfície.

Depósitos de minérios de ferro tipo BIFs, apresentam teores médios de Fe entre 20 a 30%, podendo atingir mais de 55% em alguns casos, onde praticamente metade da massa da rocha corresponde à óxidos de ferro e a outra metade ao quartzo, e baixa quantidade de outros óxidos (Al_2O_3 , MgO , etc).

Dependendo da localidade as FFB podem receber denominações como: Itabirito, Jaspelito, Taconito, Hematita Jaspe Bandado, Hematita Quartizito Bandado, etc. As FFB podem ser classificadas em 4 feições principais mostradas na tabela III.1.

Tabela III. 1 - Principais Feições das Formações Ferríferas (TAKEHARA, 2013)

	Sulfetada	Carbonática	Silicática		Óxido	
			Não granular	Granular	Magnetítica	Hematítica
Litologia	Laminado a finamente laminado, folhelho carbonático pirítico preto. <i>Chert</i> raro.	Finamente acamadado a laminado, consiste de alternância de camadas de <i>Chert</i> cinza e carbonato.	Laminada verde-claro a escuro. <i>Chert</i> raro.	Maciço verde-escuro com acamamento irregular de camadas de <i>Chert</i> e magnetita.	Finamente acamadada ou não, com alternância de magnetita e <i>Chert</i> , silicato ou silicato + carbonato.	Finamente acamadada ou não, com alternância de hematita e <i>Chert</i> cinza e jaspe vermelho.
Mineral de ferro	Pirita	Carbonato rico em ferro.	Silicato de ferro.	Silicato de ferro.	Magnetita.	Hematita cristalina.
Min. de Fe secundário	Carbonato	Pirita silicato de Fe, magnetita.	Carbonato magnetita.	Magnetita, carbonato, hematita.	Silicato de Fe carbonato hematita.	Magnetita.
% de Fe	15-25	20-35	20-30	20-30	25-35	30-40
Feição principal	"Grafitico"	Estiólitos comuns.	Estruturas laminadas.	Granulares.	Fortemente magnético.	Comumente oolítico.
Ambiente de origem	Fortemente redutor anaeróbico.	Redutor.	Variável, tipicamente meio redutor.	Meio oxidante a meio redutor.	Meio oxidante a meio redutor.	Fortemente oxidante.

3.3 - Caracterização dos Minerais de Ferro

Define-se o mineral, como substância natural de origem inorgânica, com composição química definida e propriedades físicas características (VALADÃO, 2014).

Assim, considerado o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre, o ferro está presente em mais de 400 minerais com teores detectáveis variando de menos de 1% a mais de 70%, em decorrência da abundância e alta capacidade de oxidar ou reduzir de acordo com o ambiente (TAKEHARA, 2013).

Porém nem todos são economicamente exploráveis, em função da porcentagem de ferro, concentração desses minerais que compõe os corpos de minérios, como também dos compostos formados.

Da maior para menor expressão econômica, os minerais de ferro são agrupados nas classes de óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos, conforme sua composição química, sendo que cada classe pode apresentar um ou mais minerais, conforme se observa na tabela III.2.

Tabela III. 2 - Principais Minerais de Ferro e sua Classe

Classe	Nome mineralógico	Composição química do mineral puro	Teor Fe (%)	Designação comum
Óxidos	Magnetita	Fe_3O_4	72,40	Óxido ferroso-férrico
	Hematita	Fe_2O_3	69,90	Óxido férrico
		HFeO_2 – Goethita	62,80	Hidróxido de ferro
		$\text{FeO}(\text{OH})$ – Lepidocrocita	62,85	Hidróxido de ferro
Carbonatos	Siderita	FeCO_3	48,20	Carbonato de ferro
Sulfetos	Pirita	FeS_2	46,50	Sulfeto de ferro
	Pirrotita	FeS	63,60	Sulfeto de ferro
Silicatos	Fayalita	$\text{Fe}^{2+}_2(\text{SiO}_4)$	54,81	Grupo da Olivina
	Laihunite	$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2(\text{SiO}_4)_2$	47,64	Grupo da Olivina
	Greenalita	$\text{Fe}^{2+}_{2,3}\text{Fe}^{3+}_{0,5}\text{Si}_{2,2}\text{O}_5(\text{OH})_{3,3}$	44,14	Grupo da Serpentina
	Grunerita	$\text{Fe}^{2+}_7(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	39,03	Grupo dos Anfíbios
	Fe-antofilita	$\text{Fe}^{2+}_7(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	39,03	Grupo dos Anfíbios

Os minerais de ferro atualmente comercializados são da classe dos óxidos. A viabilidade dos minerais das demais classes está condicionada às novas tecnologias de exploração e beneficiamento, e claro, preço sustentável compatível com o mercado.

Dentre os principais minerais de ferro abordados neste estudo, destaca-se:

3.3.1 - Magnetita

Com composição química Fe_3O_4 , a Magnetita contém 72,36% de ferro e 27,64% de oxigênio, cor variando de cinza a preto, densidade específica de 5,16 a 5,18 g/cm^3 . Considerada ferromagnética devido alta propriedade magnética, é facilmente separada em processo de concentração magnética de média intensidade, as vezes age como magneto natural (DEER et al., 1992). A figura 3.1 apresenta fotomicrografia de cristais martizados de magnetita.

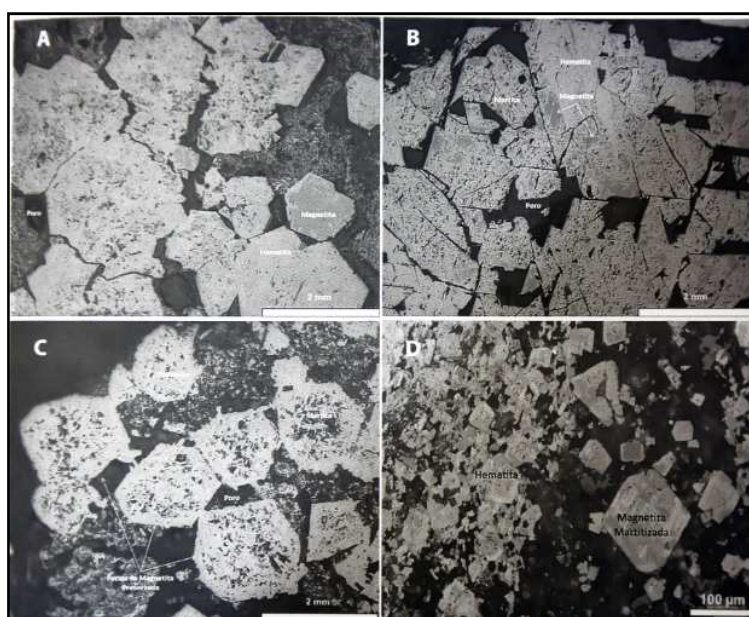


Figura 3. 1 - Fotomicrografia de Cristais Martizados de Magnetita

3.3.2 - Hematita

A Hematita Fe_2O_3 , contém 69,94% de ferro e 30,06% de oxigênio, com cor variando de cinza azulado a vermelho, brilhante e fosca, podendo ser terrosa, compacta ou cristalina, e apresenta densidade específica de 5,26 g/cm^3 .

É considerada o mais importante mineral de ferro em razão de sua larga ocorrência em vários tipos de rochas e suas origens diversas (DEER et al., 1992). Devido sua baixa susceptibilidade magnética é classificado como paramagnética, exigindo um processo de concentração magnética de alta intensidade. A figura 3.2 apresenta amostra de mão e fotomicrografia de cristais de hematita.

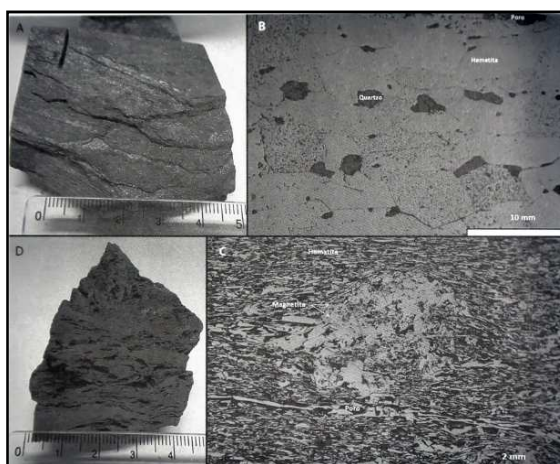


Figura 3. 2 - Amostra de Mão e Fotomicrografia de Cristais de Hematita

3.3.3 - Goethita

A Goethita de fórmula química HFeO_2 , contém 62,85% de ferro, 27,01% de oxigênio e 10,14% de água, varia de amarela ou marrom a quase preta, podendo ser compacto a terroso e ocre, e apresenta densidade específica de 3,6 a 4,0 g/cm^3 (POVEROMO, 1999; DANA, 1974). A figura 3.3 apresenta fotomicrografia de cristais de goethita.

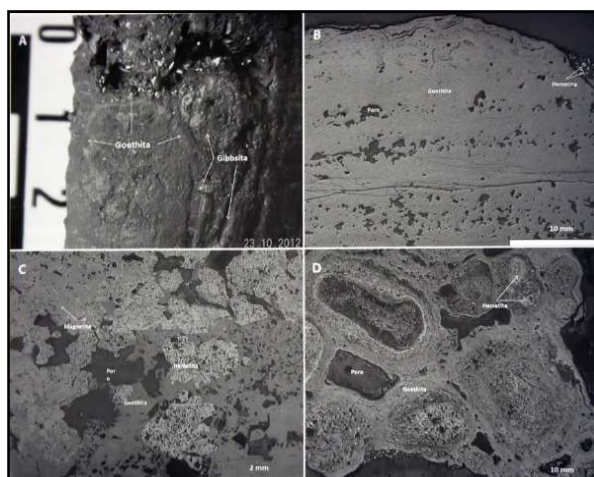


Figura 3. 3 - Fotomicrografia de Cristais de Goethita

3.4 - Minerais de Ganga

Os minerais de ganga são minerais sem interesse e de valor secundário. Ocorrem associados ao mineral minério, podendo serem metálicos ou não metálicos. O principal mineral de ganga mais abundante associado ao minério de ferro é o quartzo.

O quartzo de fórmula química SiO_2 , contém 46,7% de silício, 53,3% de oxigênio, varia de incolor, branco, violeta, azul, rosa, amarelo, vermelho, verde ou preto, podendo ter brilho vítreo a graxo, transparente a opaco e não possui clivagem, e apresenta densidade específica de $2,65 \text{ g/cm}^3$ (GUIMARÃES, 2005). A figura 3.4 apresenta amostra de mão de quartzo.



Figura 3. 4 - Amostra de Mão de Quartzo

3.5 - Caracterização do Minério de Ferro do Quadrilátero Ferrífero (QF)

Inserido em uma região de 8.000 km^2 na porção sudoeste do Craton de São Francisco, o Quadrilátero Ferrífero observado na figura 3.5 a seguir, compreende a região de Belo Horizonte, Santa Bárbara, Congonhas do Campo e Mariana (ALMEIDA et al., 1976).

É assim denominado por apresentar formato quadrangular em função da estrutura em domos e bacias em rochas ferríferas do Super Grupo Minas (DORR, 1959). É geologicamente dividido em: Embasamento (formado por rochas granito-gnáissico e vulcano-sedimentares), tipo *greenstone belts* do Supergrupo Rio das Velhas (de idade Arqueana), rochas do Supergrupo

Minas (formado por FFB paleoproterozoicas) e unidades supracrustais do Meso e Neoproterozoico.

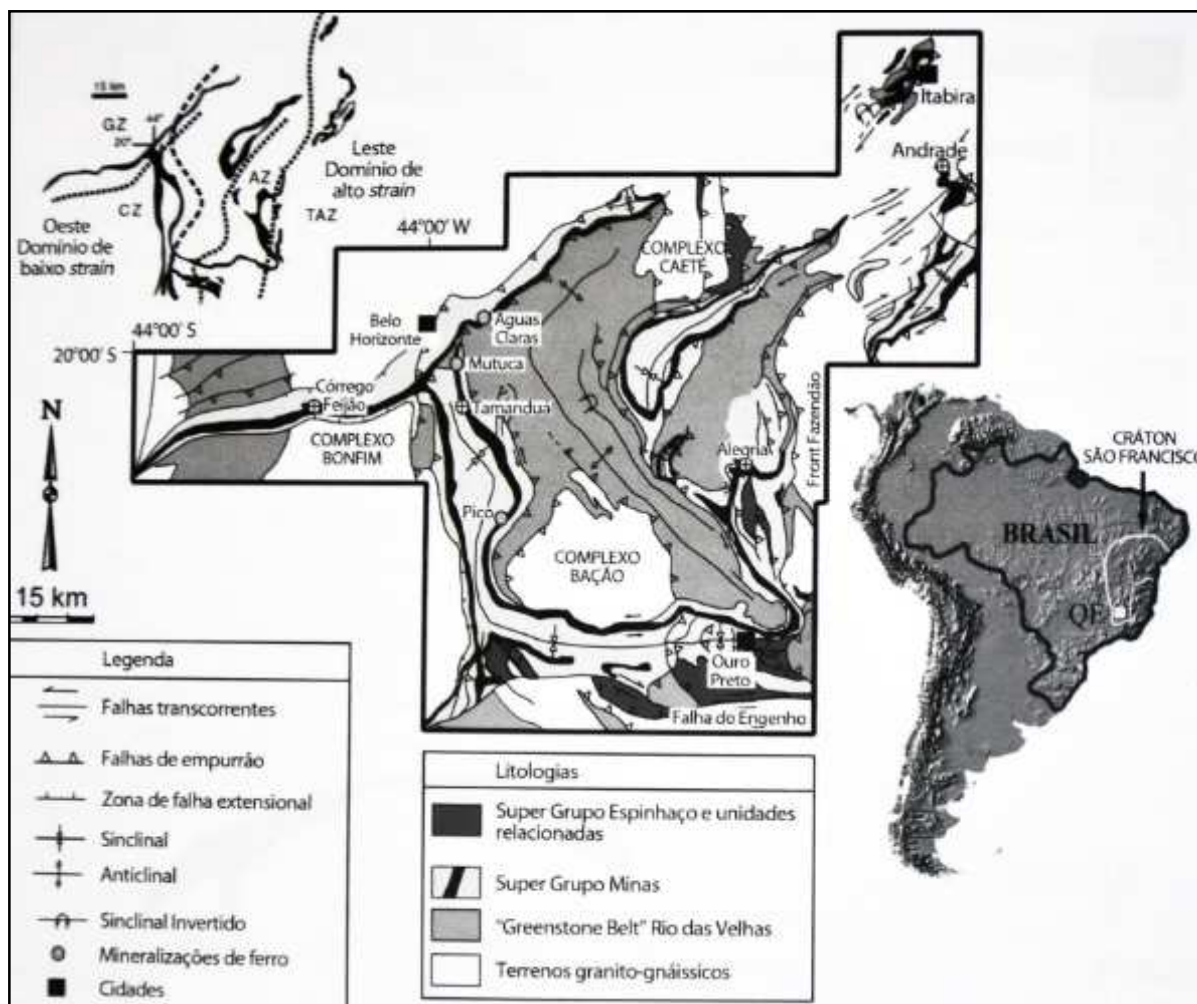


Figura 3. 5 - Mapa do Quadrilátero Ferrífero (TAKEHARA, 2013)

Classificado de acordo com a mineralogia e textura, o minério de ferro do QF pode ser dividido em minério itabirítico e minério de alto teor comumente denominado corpos de hematita (ROSIÉRE et al., 1993), conforme se observa a seguir na tabela III.3.

O minério itabirítico possui como característica a alternância das bandas constituídas por óxidos de ferro e minerais transparentes, espessura milimétrica a centimétrica, e teor primário de ferro variando entre 20% a 55% de Fe total. Comumente é classificado em friável, pulverulento, compacto ou chapinha, em função de processos supergênicos sofridos.

Como base na composição dos minerais transparentes (TAKEHARA, 2013), o itabirito pode ser classificado em:

- itabirito comum constituído de bandas ricas em quartzo e óxido de ferro;
- itabirito dolomítico constituído de bandas ricas em carbonatos e óxido de ferro;
- itabirito anfibolítico constituído de bandas com anfibólios e óxido de ferro.

Tabela III. 3 - Composição Mineralógica dos Diferentes Tipos de Minério do QF

Tipos de minérios	Componentes principais		Acessórios**
Itabirito comum	Bandas claras	Quartzo	Hematita, clorita, sericita, dolomita, pirofilita, óxido de Mn
	Bandas escuras	Óxido de ferro*	Sericita, quartzo, pirofilita
Itabirito dolomítico	Bandas claras	Dolomita	Quartzo, óxido de ferro*, pirofilita, talco, óxido de Mn
	Bandas escuras	Óxido de ferro	Quartzo, dolomita, óxido de ferro*
Itabirito anfibolítico	Bandas claras	Tremolita/ actinolita/ hornblenda, grunerita	Quartzo, dolomita, óxido de ferro*
	Bandas escuras	Óxido de ferro*	Quartzo, dolomita, anfibólio
Alto teor	Hematita		Magnetita, quartzo, pirofilita

O minério de alto teor (corpos de hematita) proveniente do enriquecimento supergênico ou intempérico, são mais homogêneos, constituídos basicamente de hematita e ricos em Fe (> 64%), normalmente encontrados em proporções variáveis na forma de lentes, dentro das camadas de itabirito.

Em função das características físicas e texturais, pode ser classificado em:

- minérios compactos que se apresentam maciços, bandados a laminados, foleados (xistosos), lineados (corpos de orientação linear) e brechados;
- minério pulverulento que se apresenta foleado/lineado e granular (grosseiro, médio e fino);
- *blue-dust*, sem estrutura interna.

3.6 - Caracterização da Geologia Local

O presente texto baseado em (ROSIÉRE et al., 1993), descreve o princípio da caracterização da geologia local. Originado em função de processos de enriquecimento hidrotermais, supergênicos ou erosivos, o minério de ferro da jazida referência (posicionada na aba ocidental do Sinclinal da Moeda do QF), apresenta teores de ferro de médio a alto.

Composta de canga, argilas lagunares e aluvião, além de solos, a jazida também apresenta filitos, xistos e quartzitos (Grupo Nova Lima) observados na coluna estratigráfica esquemática do QF, figura 3.6, tendo espessura máxima de 1.000 (hum mil) metros no norte e adelgaça-se no sul, onde é injetado por granito-gnaiss, em Itabirito.

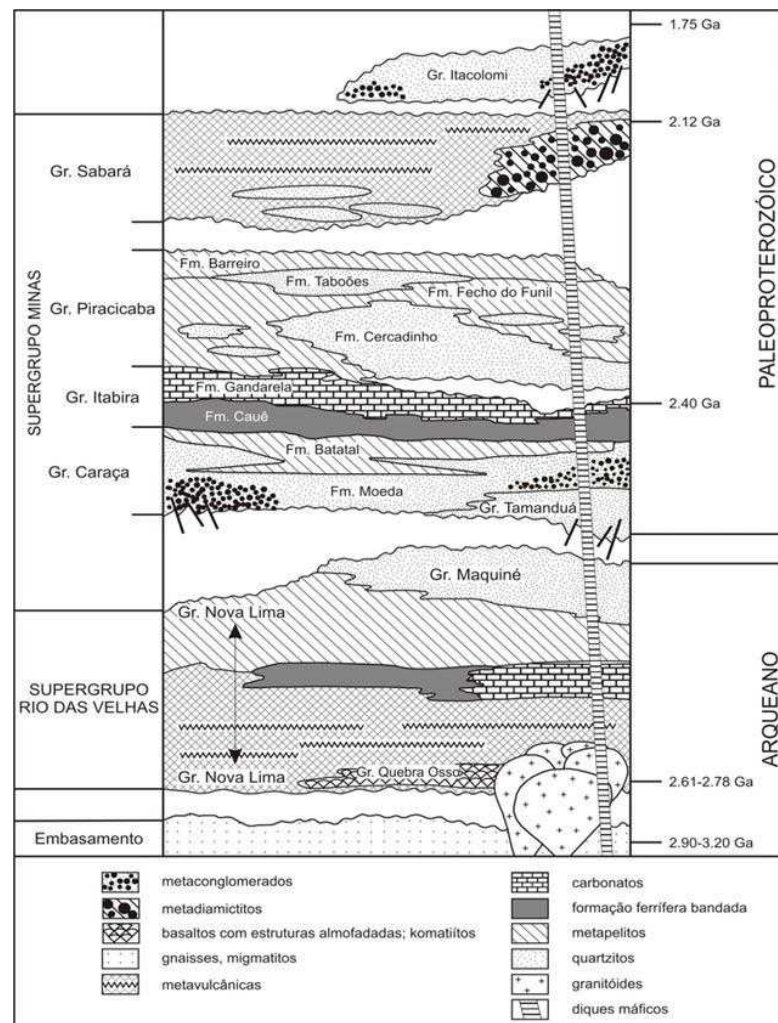


Figura 3. 6 - Coluna Estratigráfica Esquemática do QF (modificado de DORR, 1959)

Duas unidades estratigráficas do Supergrupo Minas encontra-se presentes na Jazida. A unidade inferior, representadas pela Formação Batatal (Grupo Caraça, Supergrupo Minas) tem filito sericítico acinzentado, filito dolomítico castanho amarelado e filito ferruginoso (filito sericítico com bandas de hematita bandada e/ou xistosa). O filito sericítico e o filito dolomítico entram em contato com a formação ferrífera, que pertence à formação denominada Itabirito Cauê (do Grupo Itabira, Supergrupo Minas), podendo conter itabiritos bandados silicosos e argilosos e camadas e lentes de hematitas.

O Itabirito, assim como o minério de alto teor, apresenta bandamento de origem sedimentar, caracterizada pela alternância de níveis de hematita compacta e porosa e níveis de quartzo, lepidocrocita e material argiloso, concordante com o acamamento dos filitos subjacentes.

Baseado na cor do intervalo, compacidade da rocha, foliação, presença de sílica e contaminantes, tamanho dos grãos de sílica e sua liberação, grau de hidratação, espessura de bandas de hematita e sílica, tipo de contato geológico e teores, originou-se a descrição litológica da jazida conforme se observa na tabela III.4.

Tabela III. 4 - Litologias da Jazida

Litologia	Descrição
CG	Canga
FL	Filito
HB	Hematita Branda
HBC	Hematita Branda Contaminada
HD	Hematita Dura
HDC	Hematita Dura Contaminada
HM	Hematita Mista
HMC	Hematita Mista Contaminada
IC	Itabirito Contaminado
ID	Itabirito Dolomítico
IDR	Itabirito Dolomítico Rico
IP	Itabirito Pobre
IR	Itabirito Rico
ICP	Itabirito Compacto
LAT	Laterita
MB	Metabásica
AT	Aterro
IMN	Itabirito Manganêsífero
HF	Hematita Filito

3.6.1 - Características de cada Litologia

O presente texto baseado em (BOTTKE, 1975), descreve as características das litologias presentes na jazida.

3.6.1.1 - Hematita ou Minério Hematítico

Minério contendo teor de ferro acima de 64%, o qual pode ser classificado como:

- Hematita Branda: minério de granulometria mais fina, sendo 24,99% passante na peneira de 0,15 mm, ocorrendo em toda a extensão da cava da Mina Hematita.
- Hematita Branda Contaminada: minério brando, tendo sua qualidade diminuída pela presença de contaminantes como Al, P, Mn.
- Hematita Dura: é composta por hematita compacta e granulometria acima de 50% retido na peneira de 6,35 mm.
- Hematita Dura Contaminada: minério duro tendo sua qualidade diminuída pela presença de contaminantes como Al, P, Mn.
- Hematita Mista: minério que apresenta granulometria variada, onde 49,99% a 25% é retido na peneira de 1,0 mm e passante na peneira de 6,35 mm. Em alguns locais ela envolve corpos de minério compacto.
- Hematita Mista Contaminada: minério misto, tendo sua qualidade diminuída pela presença de contaminantes como Al, P, Mn.

3.6.1.2 - Itabirito

Rocha caracterizada pela intercalação entre bandas de quartzo e óxidos de ferro, com teores de ferro abaixo de 64%, classificadas como:

- Itabirito Dolomítico: Itabirito com predominância de argila, com teores de ferro acima de 45%.
- Itabirito Dolomítico Rico: rocha com intercalações de níveis predominantemente argilosos e níveis de óxidos com teor de ferro mediano.
- Itabirito Pobre: itabirito com predominância de fração areia, com teores de ferro abaixo de 45%.
- Itabirito Rico: itabirito que possui teor de ferro entre 58% e 64% devido ao enriquecimento supergênico.
- Itabirito Compacto: itabirito que possui granulometria mais grosseira, com W1 acima de 50% retido na peneira de 6,35 mm.
- Itabirito Manganésífero: minério que contém óxido de manganês com teor igual o maior a 1%.

3.6.1.3 - Outras Litologias Presentes

- Laterita: é uma formação superficial ferruginosa e aluminosa endurecida.
- Metabásica: rocha de caráter básico que ocorre cortando o corpo de minério nas porções centro norte, norte e sul da cava.
- Hematita Filito: ocorre no contato entre o filito e o corpo de minério. Relativamente rico em alguns locais, tem espessura variando entre alguns metros e alguns centímetros.
- Filito: rocha subjacente ao corpo de minério, de coloração variada (amarela, cinza ou rosa).

3.7 - Concentração Magnética

3.7.1 - Magnetismo

O princípio básico do processo de concentração magnética se dá pelo fenômeno relacionado à propriedade de atração ou repulsão de determinados materiais, denominado magnetismo.

Pode-se dizer que observações de fenômenos magnéticos naturais são bastante antigos. Há relatos pelos Gregos na região da Ásia conhecida como Magnésia, como também indícios que os chineses detinham este conhecimento a mais tempo (LUZ, 2004).

O exemplo mais comumente conhecido são os ímãs conforme se observa na figura 3.7. Estes podem ser naturais, conhecidos como "pedra ímãs" ou artificiais, fabricados a partir de aços com propriedades específicas para este fim (ANDREUCCI, 2007).

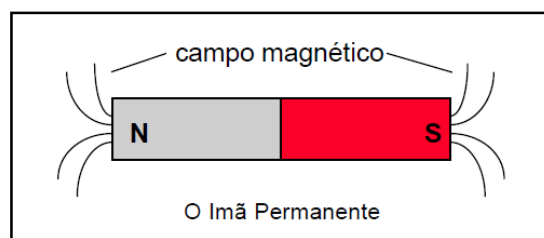


Figura 3. 7 - Ímã Permanente

Verifica-se em um ímã ou barra imantada, que as extremidades apresentam forças magnéticas diferentes de atração e repulsão, onde o ponto que apresentar a atração com maior intensidade é denominado polo magnético.

A região que sofre alteração em função do magnetismo é denominado como "campo magnético", e este pode ser visualizada através das linhas de indução ou linhas de fluxo.

A magnetização representada pelo número de linhas de força que passa pela unidade de área do material, está relacionada com a intensidade de magnetização (VALADÃO et al., 2012).

Poucos minerais apresentam magnetismo, mas para aqueles que o fazem, o magnetismo pode ser uma propriedade diagnóstica (KLEIN et al., 2012). Assim, os minerais são classificados

em: i - diamagnéticos: para aqueles que não apresentam atração pelo campo magnético, ii - paramagnéticos: aqueles que são atraídos fracamente pelo campo, enquanto o mesmo estiver presente, iii - ferromagnéticos: aqueles que são atraídos fortemente pelo campo magnético.

3.7.2 - Grandezas e Unidades Utilizadas

Quando se trabalha com campo magnético (VALADÃO et al., 2012), utiliza-se as seguintes grandezas / simbologias:

- Densidade de Fluxo Magnético (B): refere-se ao número de linhas de indução ou linhas de fluxo que passam através do material (partícula mineral) por uma determinada área.
- Intensidade de Campo (H): refere-se a força de magnetização que induz a passagem das linhas de indução ou linhas de fluxo através do material (partícula mineral), variando de acordo com o número de linhas.

$$B = \mu_0 (H + M)$$

Onde:

μ_0 = permeabilidade no espaço = $4\pi \times 10^{-7}$ (tesla.metro/ampere)

No vácuo $M = 0$ e no ar seu valor é muito baixo, logo:

$$B = \mu_0 H$$

Um campo com intensidade de 10.000 gauss, corresponde a um conjunto de 10.000 linhas de força que atravessam uma área de 1 cm^2 , conforme exemplificado na figura 3.8.

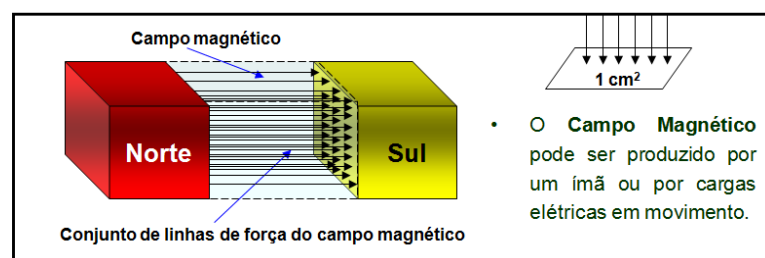


Figura 3. 8 - Linhas de Força do Campo Magnético (RODRIGUES et al., 2008)

A relação entre a intensidade de magnetização (M) do material e/ou partícula mineral e a força de magnetização, é denominado susceptibilidade magnética (K).

$$K = \frac{M}{H}$$

Observa-se na figura 3.9 que K assume valores positivos para materiais paramagnéticos (minerais fracamente atraídos pela ação de um campo magnético, Ex: hematita) com valores inferiores a 10^{-3} . Materiais diamagnéticos (minerais que não são atraídos quando submetidos a ação de um campo magnético, Ex: Quartzo) K assume valores negativos em módulo inferiores a 10^{-5} .

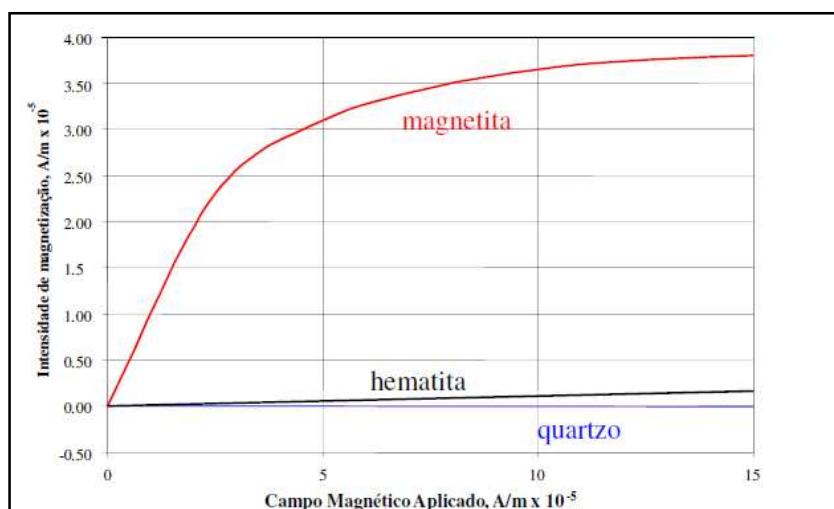


Figura 3. 9 - Gráfico da Intensidade de Magnetização x Campo Magnético (LUZ, 2004)

A tabela III.5 apresenta um resumo das grandezas e unidades magnéticas.

Tabela III. 5 - Grandezas e Unidades Magnéticas (PAPINI, 2014)

Quantidade	Símbolo	Unidade SI	Unidade cgs	Fator de Conversão
Força de Campo Magnético	H	A/m	Oersted (Oe)	$10^3/4\pi$
Indução Magnética (Densidade de Fluxo)	B	Tesla (T)	Gauss (G)	10^{-4}
Magnetização	M	A/m	Oe, erg/Gcm ³	10^3
Permeabilidade do Vácuo	μ_0	H/m	1 dimensão	$4\pi \cdot 10^{-7}$
Susceptibilidade Magnética	K	dimensão	dimensão	10^{-3}

3.7.3 - Geração do Campo Magnético

O campo magnético pode ser produzido por um ímã permanente (material ferromagnético) ou por cargas elétricas em movimento (corrente elétrica).

No caso de ímãs permanentes, estes tem a propriedade de atrair o ferro não magnetizado. Uma vez magnetizado e mantendo esta propriedade, pode-se caracterizar como magnetização permanente (ALVES, 2003).

Já o campo magnético provocado por cargas elétricas em movimento, se dá pela deslocação orientada de cargas, ou seja, aproximando dois condutores por corrente elétrica, estes ficam sujeitos a força de atração ou repulsão (Força de Laplace) conforme sentido das correntes.

Em ambos os casos, a partícula se torna magnetizada ao ser submetida a ação do campo magnético, induzindo a formação de pólos magnéticos nas extremidades da partícula que ficará orientada ao longo das linhas de fluxo do campo magnético.

3.7.4 - Processo de Concentração Magnética

Concentração magnética é um método de separação de misturas heterogêneas de componentes sólidos, onde se obtém no concentrado os minerais e/ou metais que são atraídos pelo campo magnético aplicado, utilizando-se como propriedade diferenciadora o comportamento ou resposta do mineral sob a ação de um campo magnético.

O comportamento da partícula mineral pode variar dependendo da característica de cada partícula. Existem diversas técnicas de concentração magnética, e estas são aplicadas de acordo com as características e propriedades de cada mineral.

No processo de concentração à úmido, as partículas sofrem a atuação das forças:

- força magnética;
- força de gravidade;
- força de arraste hidrodinâmico;

- força inter-partículas.

A trajetória final das partículas está condicionada pela sua susceptibilidade magnética e composição das demais forças somada a ação de cada uma sobre as partículas de características diferentes. A resultante da ação da força magnética e demais forças competitivas levará a recuperação da partícula magnética.

Não se limitando a isto, a recuperação mássica e metalúrgica, também é resultado da escolha do equipamento adequado conforme as características do minério (grau de liberação, tamanho de partículas, composição química, propriedades físicas e mineralógicas, entre outras), além das variáveis de projeto e processo aplicadas.

Os equipamentos utilizados na abordagem deste estudo para o processo de concentração magnética do minério de ferro são: Concentrador Magnético do tipo Tambor e Concentrador Magnético do tipo Carrossel (WHIMS).

O Concentrador Magnético do tipo Tambor (LIMS) utilizado na etapa Rougher e ilustrado na figura 3.10, apresenta campo magnético de média intensidade (6.000 Gauss), objetivando recuperação de minerais com alta susceptibilidade magnética tais como: magnetita, hematita martítica e agregados de hematita magnética, com partículas de faixa de tamanho de diâmetro entre 3,0 mm a 0,100 mm.

É comum utilizar o Concentrador Magnético do tipo Tambor como sistema de proteção ou desbaste antes da Concentração Magnética do tipo Carrossel (WHIMS) ou Ferrous Wheels, em função da mineralogia da jazida.

As principais variáveis do Concentrador Magnético do tipo tambor, são:

Variáveis de Projeto:

- inclinação do circuito magnético;
- abertura (gap) entre tanque e tambor magnético;
- tipo de revestimento do tambor (borracha ou cerâmico);

Variáveis de Processo:

- intensidade do campo magnético em função da escolha do imã permanente;
- % de sólidos na alimentação;
- taxa de alimentação (t/h);
- velocidade de rotação do tambor (rpm);
- abertura dos bocais de descarga (spigots) de rejeito;
- sistema de limpeza (sprays);
- espessura do revestimento do tambor.

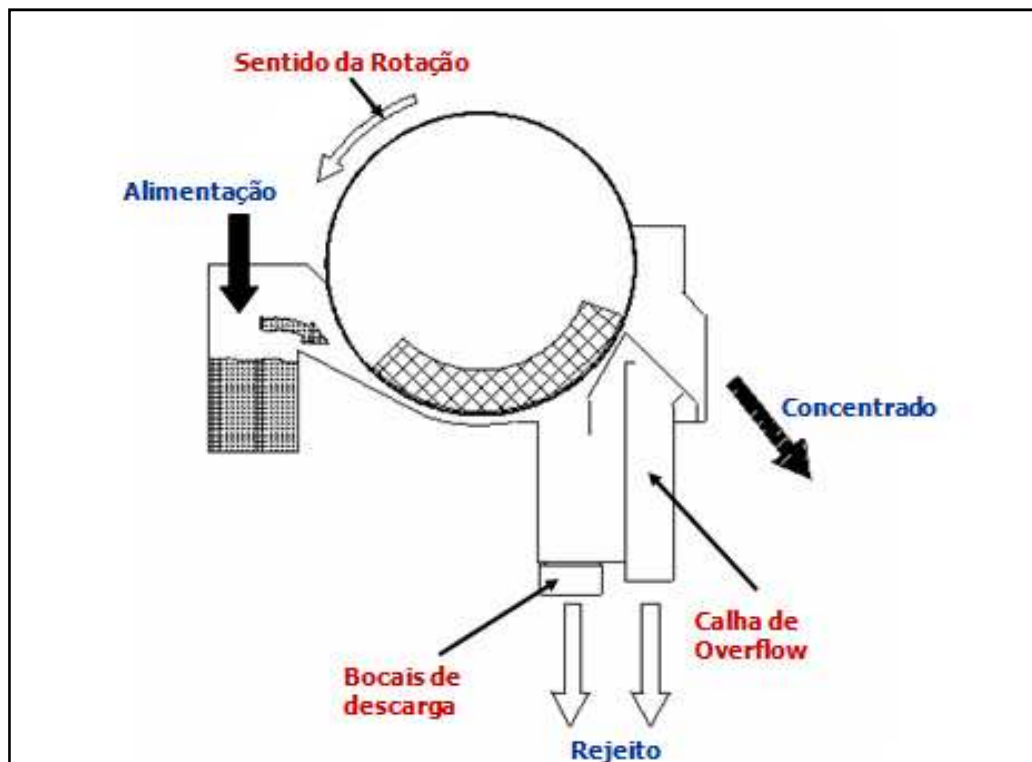


Figura 3. 10 - Princípio Esquemático de Concentração Magnética do tipo Tambor
(RODRIGUES et al., 2008)

O Concentrador Magnético do tipo Carrossel (WHIMS) utilizado nas etapas Scavenger 1 e 2 ilustrado na figura 3.11 a seguir, apresenta campo magnético de alta intensidade, variando de 9.000 a 12.000 Gauss, utilizado para recuperar minerais de baixa a média susceptibilidade magnética tais como: hematita, goethita, limonita, hematita martítica (se não houver magnetita reliquiar), com partículas de tamanho de diâmetro variando de 1,0 mm a 0,010 mm.

As principais variáveis desse tipo de Concentrador Magnético, são:

Variáveis de Projeto:

- nº de estágios utilizados;
- abertura (gap) das matrizes.

Variáveis de Processo:

- % de sólidos na alimentação;
- taxa de alimentação (t/h);
- granulometria de alimentação;
- velocidade de rotação do rotor (rpm);
- intensidade do campo magnético (gauss);
- pressão de água de lavagem (médio e concentrado);
- destino do fluxo de médio.

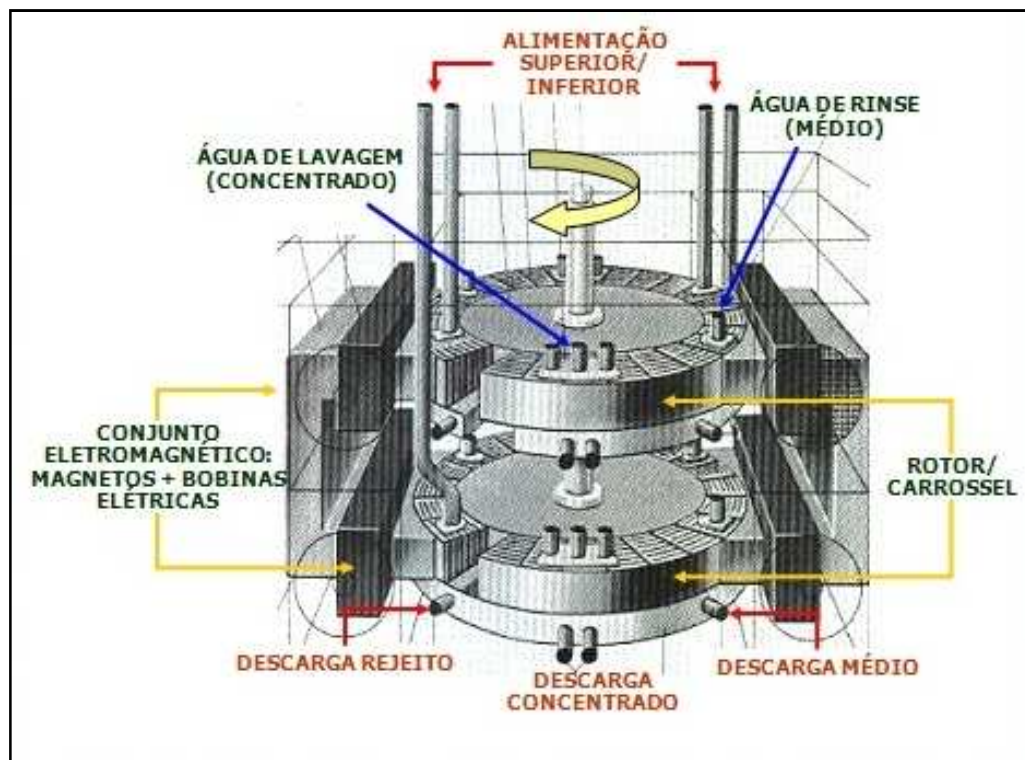


Figura 3. 11 - Princípio Esquemático de Concentração Magnética do tipo Carrossel
(RODRIGUES et al., 2008)

3.8 - Caracterização de Minérios

Etapa fundamental para se obter o máximo e otimizado aproveitamento do recurso mineral, a Caracterização de Minérios fornece aos tratamentistas (engenheiro, técnicos, etc) subsídios mineralógicos e texturais importantes ao correto dimensionamento de uma rota de processo e/ou ajustes em rotas já existentes (NEUMANN et al., 2002).

A caracterização objetiva determinar e quantificar toda a assembleia mineralógica, identificar os minerais de interesse (se mais de um), os minerais de ganga, definir o tamanho da partícula necessário para liberação do (s) mineral (is) de interesse, além de propriedades físicas e químicas que poderão definir o melhor método de beneficiamento.

De maneira geral, o processo de caracterização é executado em estágios. O 1º estágio denominado fracionamento da amostra, frequentemente realizado por densidade, susceptibilidade magnética e classificação de tamanho de partícula, já pode estabelecer certas propriedades físicas dos minerais.

O 2º estágio envolvendo a identificação das fases, dispõe da aplicação de uma variada gama de técnicas analíticas para identificação dos minerais, sendo as mais difundidas a microscopia óptica e eletrônica de varredura, e difração de raio X.

A quantificação da amostra, 3º estágio, é uma etapa bastante importante e geralmente mais complexa. Comumente são aplicados nesta etapa cálculos estequiométricos a partir de análise química e da composição mineralógica da amostra, difração de raio X, análise termogravimétricas e imagens.

Por fim, sendo uma das mais importantes etapas da caracterização, o 4º estágio consiste em verificar o grau de liberação do (s) mineral (is) de interesse em relação aos minerais de ganga. As técnicas geralmente aplicadas pode ser o método de Gaudin, através da microscopia óptica no qual se obtém estimativas de grau de liberação por faixa de tamanho e/ou análise de imagem (técnica mais moderna), podendo fornecer resultados mais precisos e completos.

4 - METODOLOGIA

Neste tópico serão abordadas as metodologias adotadas envolvendo a obtenção e preparação das amostras, além dos ensaios de caracterização desenvolvidos.

4.1 - Obtenção, Identificação e Preparação das Amostras

Durante o período de operação da Instalação de Tratamento de Minério, realizou-se em escala industrial a obtenção das amostras de alimentação, concentrado e rejeito da etapa de concentração magnética, através da coleta de incrementos de hora em hora durante um intervalo de 24 (vinte e quatro) horas, objetivando garantir a representatividade da diversidade tipológica de cada ROM, além de garantir a realização dos ensaios de caracterização.

As amostras coletadas receberam a seguinte identificação:

Alimentação - Concentração Magnética

- Amostra 1 – 26/11/14
- Amostra 2 – 04/12/14
- Amostra 3 – 09/12/14

Concentrado - Concentração Magnética

- Amostra 1 – 26/11/14
- Amostra 2 – 04/12/14
- Amostra 3 – 09/12/14

Rejeito - Concentração Magnética

- Amostra 1 – 26/11/14
- Amostra 2 – 04/12/14
- Amostra 3 – 09/12/14

Após recebimento e conferência pelo laboratório, as amostras passaram pelas etapas de preparação envolvendo secagem, desagregação, homogeneização e quarteamento, conforme massas requeridas para os ensaios de caracterização.

4.2 - Caracterização das Amostras

4.2.1 - Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica foi realizada quantificando as partículas minerais monocristalinas (método da contagem de partículas), com auxílio do Microscópio Óptico de Luz Refletida da marca LEICA, modelo DMLP (SANTOS, 2015).

A preparação das seções polidas foi realizada em molde circulares de diâmetro de 2,5 cm, embutidas em resina e misturada com produtos químicos especiais (acelerador de cobalto, catalisador e estireno). Em seguida as seções são desembutidas e levadas a estufa de secagem (cerca de 70 a 100 °C), por 15 minutos. Posteriormente, foi realizado o nivelamento manual com auxílio da politriz com acoplamento de lixas d'água. Já o processo final de nivelamento e polimento foi realizado com abrasivos e polimento em pano umedecido com pasta de alumina ou diamante acoplado no disco da politriz, a avaliação final foi realizada em lupa binoculares com aumento 45x (SANTOS, 2015).

4.2.2 - Caracterização Granulométrica

Após o quarteamento das alíquotas destinadas aos ensaios de caracterização granulométrica, as mesmas foram submetidas à peneiramentos úmidos em peneirador suspenso de procedência da Top Size Soluções, com capacidade de 10 peneiras redondas (8"x 2"). Além do peneiramento para determinação da distribuição granulométrica da amostra, foram realizados outros peneiramentos com objetivo de geração de massa para ensaios subseqüentes, entre outras caracterizações (SANTOS, 2015).

Os ensaios de micro análise para a fração granulométrica $< 0,045$ mm, resultante do peneiramento convencional descrito acima, foram realizados com auxílio do granulômetro CILAS 920 L, onde as partículas foram determinadas por difração de luz incidente na polpa mineral.

4.2.3 - Determinação do Grau de Liberação (Método Gaudin)

Para determinação do grau de liberação foi realizada uma quantificação das partículas mineralizadas livres, das não mineralizadas livres e das partículas mistas. Esta quantificação proporcionou uma estimativa em percentagens, buscando um valor que seja próximo do valor real, com auxílio do Microscópio Óptico de Luz Refletida da marca LEICA, modelo DMLP (SANTOS, 2015).

A determinação do % percentual de liberação da amostra de óxidos/hidróxidos de ferro e minerais de ganga, baseou-se no Método de Gaudin, sendo:

$$gl = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ de partículas livres}}{\text{n}^{\circ} \text{ de partículas livres} + \text{mistas}} \times 100$$

4.2.4 - Análise Química

Uma vez concluído o processo de pulverização das amostras, as mesmas foram encaminhadas para realização das análises químicas baseadas nas normas técnicas vigentes, sendo:

Determinação multielementar por ICP OES Mod. SPECTRO ARCOS SOP – Espectrometria de Emissão Ótica por Plasma Acoplado Indutivamente para determinação de elementos maiores e traços (Si, Al, P, Mn, Ca, Mg, Ti, K, Ba, Zr, SiO₂, Al₂O₃, P, Mn, TiO₂, CaO, MgO e K₂O).

Determinação de Fe total e FeO por dicromatometria.

Determinação de perda ao fogo e teor de resíduo insolúvel por gravimetria.

4.2.5 - Pesagem e Secagem

As pesagens das amostras foram realizadas em balanças da marca Bel Mark 4 e 16, MARTELS, e SHIMADZU BL 3200 H, ambas devidamente calibradas e certificadas por empresa especializadas. Já a secagem das amostras foram realizadas em estufas com circulação mecânica Mod. 320 E da marca FANEM, com temperatura programada para 105 °C (SANTOS, 2015).

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - Caracterização Mineralógica das Amostras

Será abordado neste tópico, os resultados da identificação mineralógica das amostras de alimentação, concentrado e rejeito da etapa de concentração magnética.

5.1.1 - Caracterização Mineralógica das Amostras de Alimentação

Mineralogia Alimentação - Amostra 1 (26/11/14)

A tabela V.1 apresenta a mineralogia da amostra 1 do fluxo de alimentação.

Tabela V. 1 - Mineralogia da Amostra de Alimentação - 26/11/14

Mineralogia com Percentagem em Peso	
Hematita Especular	6,56%
Hematita Lamelar	12,69%
Hematita Granular	2,41%
Hematita Microcristalina	0,00%
Hematita Recristalizada	9,84%
Hematita Martítica	35,22%
Goethita Botrioidal	15,12%
Goethita Maciça	0,00%
Goethita Terrosa	0,73%
Goethita Anfíbólica	0,00%
Magnetita	1,72%
Quartzo Inteiro	13,99%
Quartzo Misto	0,14%
Manganês	0,00%
Filossilicato	1,58%
Ilmenita	0,00%
Mica	0,00%
Anfíbólio	0,00%
Carbonato	0,00%
FECHAMENTO	100,00%
MINERAIS CONTADOS	543

As figuras 5.1 e 5.2 a seguir, apresentam fotomicrografia da amostra 1 do fluxo de alimentação.

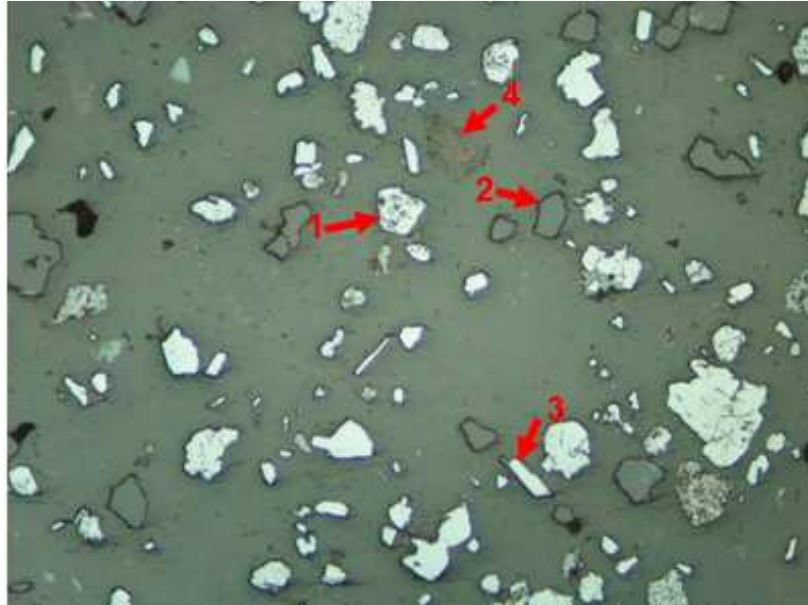


Figura 5. 1 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Alimentação - 26/11/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de hematita martítica (1), quartzo inteiro (2), hematita lamelar (3) filossilicato e (4) Goethita Botrioidal.

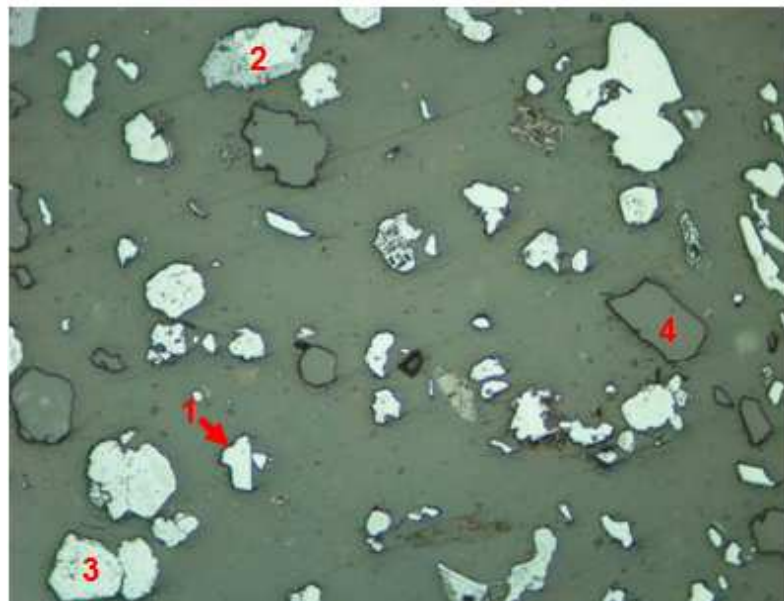


Figura 5. 2 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Alimentação - 26/11/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de hematita lamelar (1), partícula constituída por hematita martítica e goethita botrioidal (2), hematita martítica (3), quartzo inteiro (4).

Mineralogia Alimentação - Amostra 2 (04/12/14)

A tabela V.2 apresenta a mineralogia da amostra 2 do fluxo de alimentação.

Tabela V. 2 - Mineralogia da Amostra de Alimentação - 04/12/14

Mineralogia com Percentagem em Peso	
Hematita Especular	3,79%
Hematita Lamelar	7,23%
Hematita Granular	2,59%
Hematita Microcristalina	0,00%
Hematita Recristalizada	9,14%
Hematita Martítica	31,90%
Goethita Botrioidal	18,52%
Goethita Maciça	0,00%
Goethita Terrosa	1,41%
Goethita Antibólita	0,00%
Magnetita	1,74%
Quartzo Inteiro	20,57%
Quartzo Misto	0,19%
Manganês	0,36%
Filossilicato	2,55%
Ilmenita	0,00%
Mica	0,00%
Anfibólio	0,00%
Carbonato	0,00%
FECHAMENTO	99,99%
MINERAIS CONTADOS	598

As figuras 5.3 e 5.4 a seguir, apresentam fotomicrografia da amostra 2 do fluxo de alimentação.

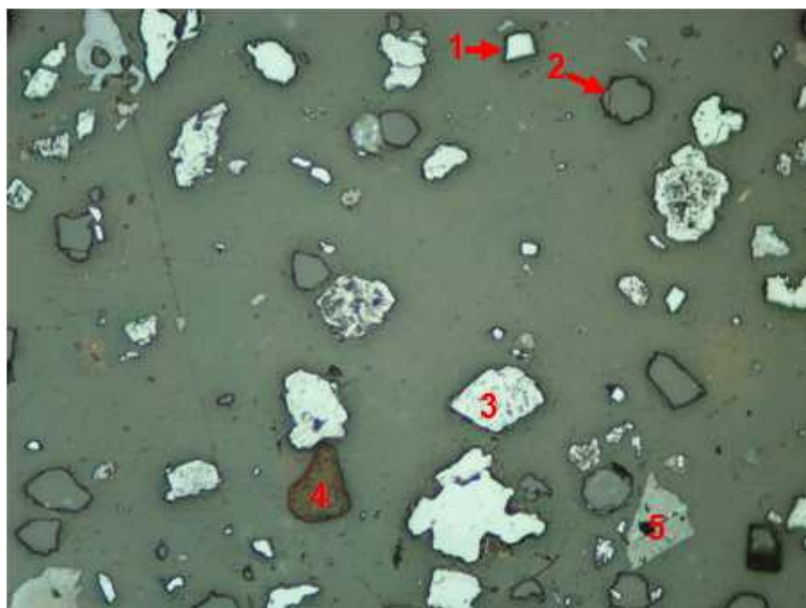


Figura 5. 3 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Alimentação - 04/12/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de hematita granular (1), quartzo inteiro (2), hematita martítica (3), filossilicato (4) e goethita botrioidal (5).

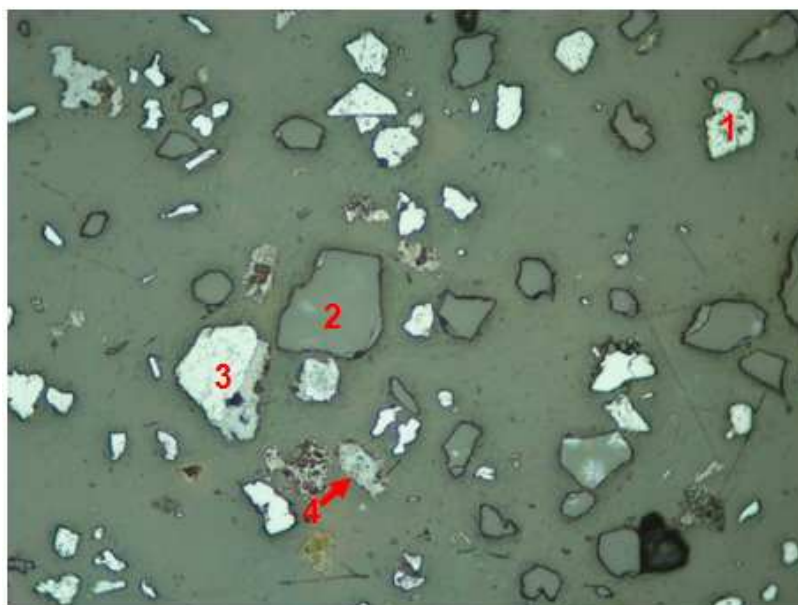


Figura 5. 4 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Alimentação - 04/12/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de hematita martítica (1), quartzo inteiro (2), partícula constituída de goethita botrioidal e hematita martítica (3), goethita botrioidal (4).

Mineralogia Alimentação - Amostra 3 (09/12/14)

A tabela V.3 apresenta a mineralogia da amostra 3 do fluxo de alimentação.

Tabela V. 3 - Mineralogia da Amostra de Alimentação - 09/12/14

Mineralogia com Percentagem em Peso	
Hematita Especular	5,14%
Hematita Lamelar	12,01%
Hematita Granular	2,69%
Hematita Microcristalina	0,00%
Hematita Recristalizada	14,64%
Hematita Marítica	23,76%
Goethita Botrioidal	16,41%
Goethita Maciça	0,18%
Goethita Terrosa	0,74%
Goethita Anfibólica	0,00%
Magnetita	0,74%
Quartzo Inteiro	20,40%
Quartzo Misto	0,09%
Manganês	0,19%
Filossilicato	3,01%
Ilmenita	0,00%
Mica	0,00%
Anfibólio	0,00%
Carbonato	0,00%
FECHAMENTO	100,00%
MINERAIS CONTADOS	570

As figuras 5.5 e 5.6 a seguir, apresentam fotomicrografia da amostra 3 do fluxo de alimentação.

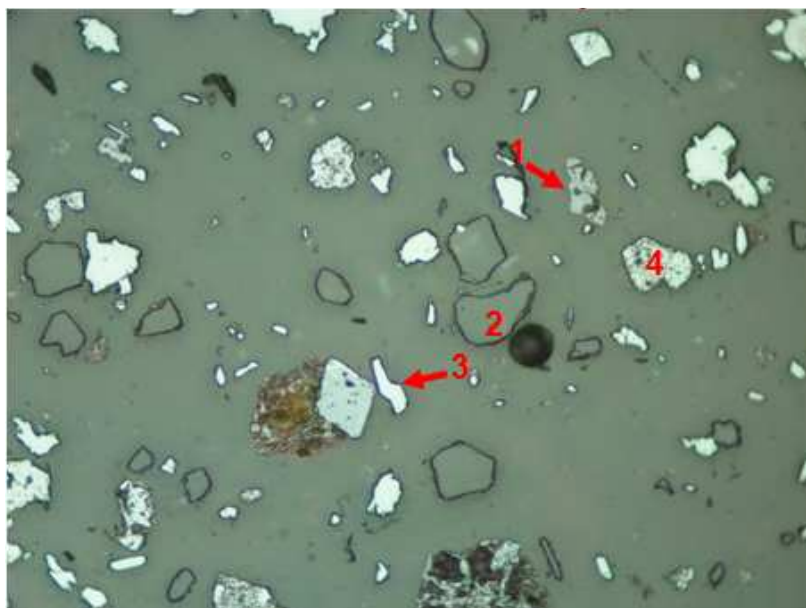


Figura 5. 5 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Alimentação - 09/12/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de goethita botrioidal (1), quartzo inteiro (2), hematita lamelar (3), hematita martítica (4).



Figura 5. 6 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Alimentação - 09/12/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de quartzo inteiro (1), hematita especular (2), hematita lamelar (3).

A figura 5.7, permite observar de forma clara, toda a gama de minerais que compõe os óxidos de ferro e minerais de ganga, identificados na análise mineralógica. Além de todos os

minerais que encontram-se presentes em ambas as amostras, observa-se que a distribuição e/ou proporção de cada mineral apresenta certa regularidade.

Dentre os óxidos de ferro com maior participação nas amostras de alimentação da concentração magnética conforme se observa na figura 5.8, destaca-se presença da hematita martítica, seguido da goethita botrioidal. Estes dois minerais totalizam 59% de toda população de óxidos de ferro. A segunda maior população de óxidos de ferro se deve a presença da hematita recristalizada e da hematita lamelar, totalizando 28% da massa de ferro.

A magnetita possui baixa participação, cerca de 2% do total de dos óxidos de ferro. Entretanto, devido a grande presença da hematita martítica (mineral de alta susceptibilidade magnética assim como a magnetita), torna-se adequado a aplicação de Concentradores Magnéticos do tipo Tambor (LIMS), na etapa Rougher.

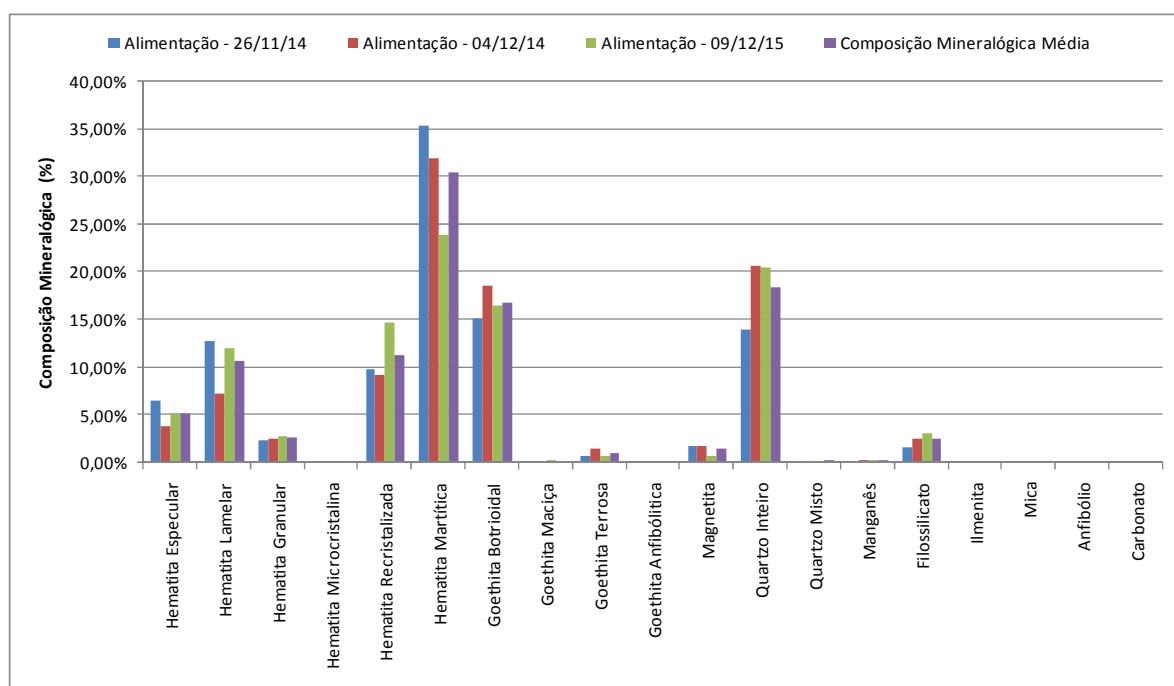


Figura 5. 7 - Composição Mineralógica Global das Amostras de Alimentação

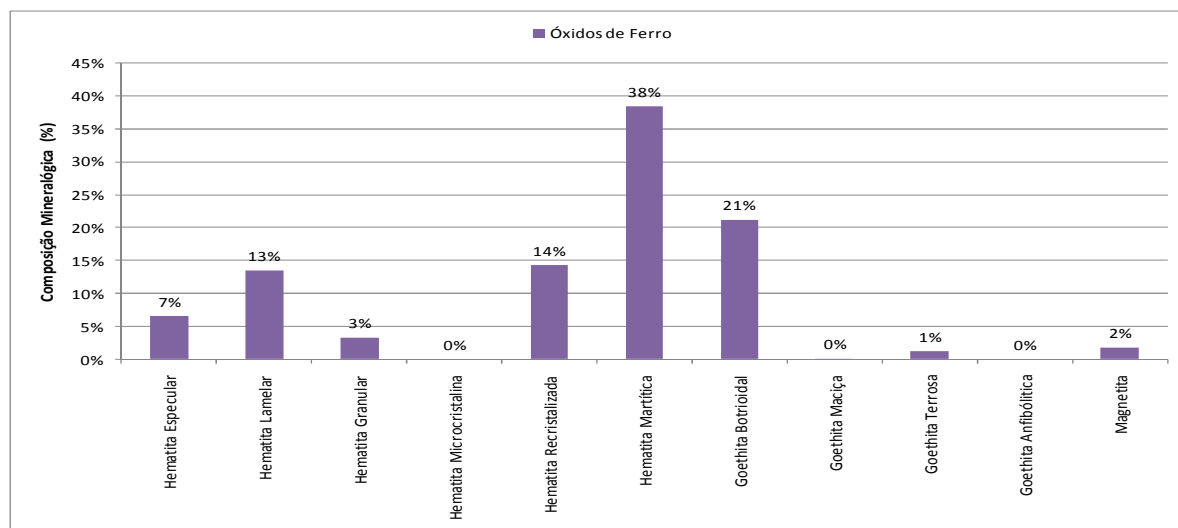


Figura 5. 8 - Composição Mineralógica dos Óxidos de Ferro das Amostras de Alimentação

5.1.2 - Caracterização Mineralógica das Amostras de Concentrado

Mineralogia Concentrado - Amostra 1 (26/11/14)

A tabela V.4 apresenta a mineralogia da amostra 1 do fluxo de concentrado.

Tabela V. 4 - Mineralogia da Amostra de Concentrado - 26/11/14

Mineralogia com Percentagem em Peso	
Hematita Especular	4,99%
Hematita Lamelar	12,64%
Hematita Granular	4,01%
Hematita Microcristalina	0,00%
Hematita Recristalizada	11,57%
Hematita Martítica	55,94%
Goethita Botrioidal	4,51%
Goethita Maciça	0,00%
Goethita Terrosa	0,15%
Goethita Antibiótica	0,00%
Magnetita	2,45%
Quartzo Inteiro	3,05%
Quartzo Misto	0,19%
Manganês	0,00%
Filossilicato	0,51%
Ilmenita	0,00%
Mica	0,00%
Antibólio	0,00%
Carbonato	0,00%
FECHAMENTO	100,01%
MINERAIS CONTADOS	588

As figuras 5.9 e 5.10, apresentam fotomicrografia da amostra 1 do fluxo de concentrado.



Figura 5. 9 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Concentrado - 26/11/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de hematita especular (1), hematita lamelar (2), hematita martítica (3), partícula constituída de hematita martítica e goethita botrioidal (4).

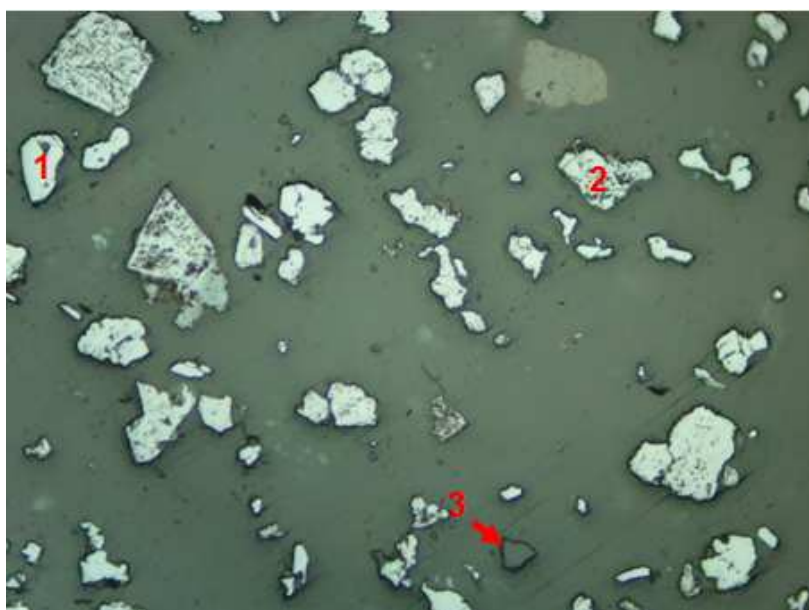


Figura 5. 10 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Concentrado - 26/11/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de hematita lamelar (1), hematita martítica(2), quartzo inteiro (3).

Mineralogia Concentrado - Amostra 2 (04/12/14)

A tabela V.5 apresenta a mineralogia da amostra 2 do fluxo de concentrado.

Tabela V. 5 - Mineralogia da Amostra de Concentrado - 04/12/14

Mineralogia com Percentagem em Peso	
Hematita Especular	4,83%
Hematita Lamelar	6,34%
Hematita Granular	1,95%
Hematita Microcristalina	0,00%
Hematita Recristalizada	19,31%
Hematita Martítica	53,13%
Goethita Botrioidal	6,10%
Goethita Maciça	0,00%
Goethita Terrosa	0,00%
Goethita Anfibólica	0,00%
Magnetita	4,19%
Quartzo Inteiro	2,67%
Quartzo Misto	0,11%
Manganês	0,00%
Filossilicato	1,37%
Ilmenita	0,00%
Mica	0,00%
Anfibólio	0,00%
Carbonato	0,00%
FECHAMENTO	100,00%
MINERAIS CONTADOS	557

As figuras 5.11 e 5.12, apresentam fotomicrografia da amostra 2 do fluxo de concentrado.

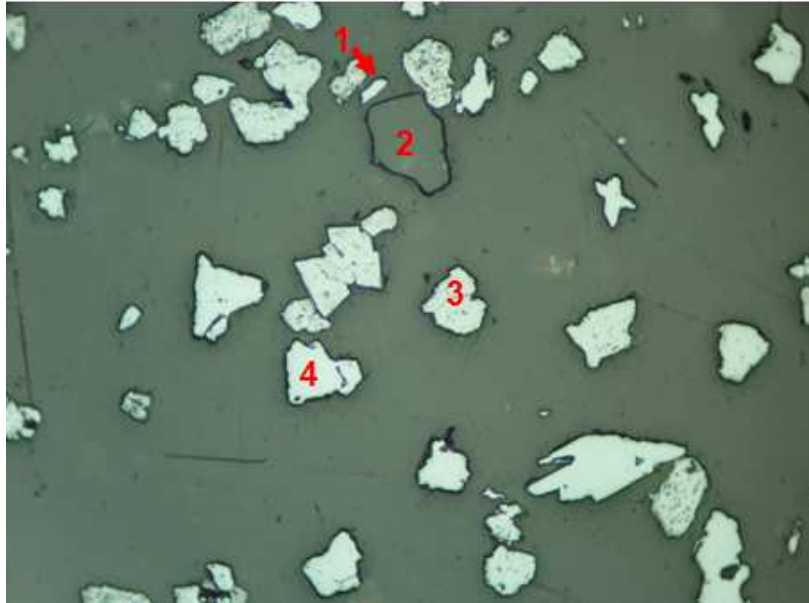


Figura 5. 11 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Concentrado - 04/12/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de hematita lamelar (1), quartzo inteiro (2), hematita martítica (3), hematita recristalizada (4).

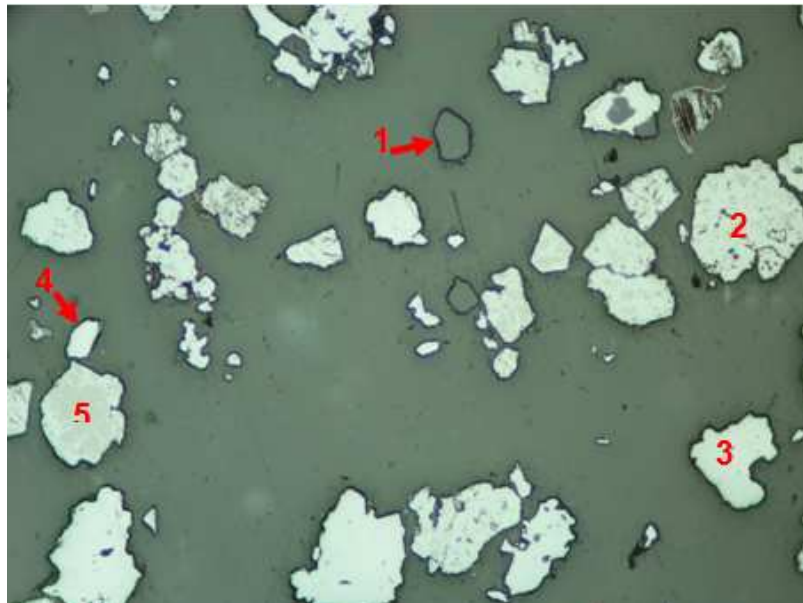


Figura 5. 12 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Concentrado - 04/12/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de quartzo inteiro (1), hematita martítica (2), hematita recristalizada (3), hematita lamelar (4), magnetita (5) .

Mineralogia Concentrado - Amostra 3 (09/12/14)

A tabela V.6 apresenta a mineralogia da amostra 3 do fluxo de concentrado.

Tabela V. 6 - Mineralogia da Amostra de Concentrado - 09/12/14

Mineralogia com Percentagem em Peso	
Hematita Especular	3,86%
Hematita Lamelar	11,18%
Hematita Granular	1,94%
Hematita Microcristalina	0,00%
Hematita Recristalizada	19,50%
Hematita Marítica	47,24%
Goethita Botrioidal	10,54%
Goethita Maciça	0,00%
Goethita Terrosa	0,16%
Goethita Antibólita	0,00%
Magnetita	2,59%
Quartzo Inteiro	1,52%
Quartzo Misto	0,08%
Manganês	0,00%
Filossilicato	1,40%
Ilmenita	0,00%
Mica	0,00%
Antibólio	0,00%
Carbonato	0,00%
FECHAMENTO	100,01%
MINERAIS CONTADOS	559

As figuras 5.13 e 5.14, apresentam fotomicrografia da amostra 3 do fluxo de concentrado.



Figura 5. 13 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Concentrado - 09/12/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de quartzo inteiro (1), hematita lamelar (2), hematita martítica (3), hematita recristalizada (4).

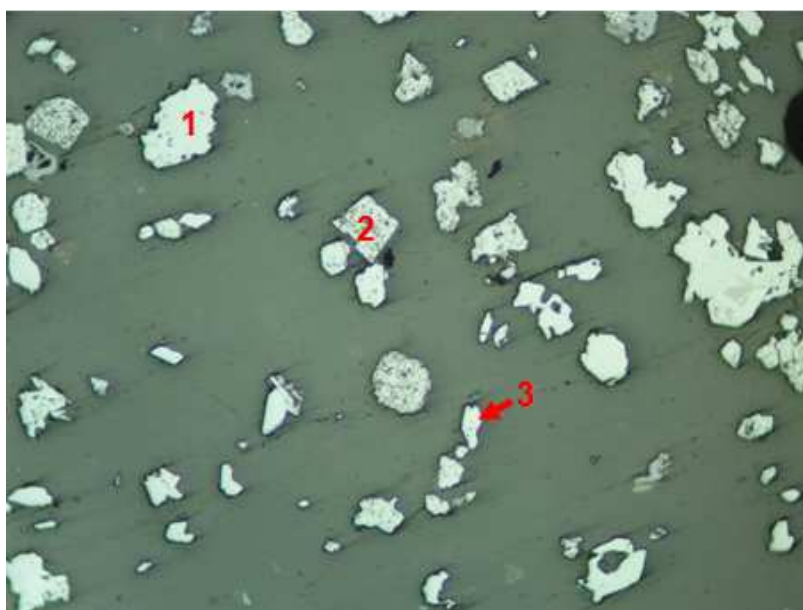


Figura 5. 14 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Concentrado - 09/12/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de hematita recristalizada (1), hematita martítica (2), hematita lamelar (3).

Da mesma forma que as amostras de alimentação, observar-se na figura 5.15, uma certa homogeneidade dos minerais, ou seja, todos os minerais identificados na análise

mineralógica, encontram-se presentes em ambas as amostras de concentrado. Exceto para a hematita martítica e magnetita, identifica-se na figura 5.16 baixa eficiência da concentração magnética para a recuperação dos demais óxidos de ferro, principalmente a goethita botrioidal. Para a goethita terrosa, pode-se considerar praticamente nula sua recuperação.

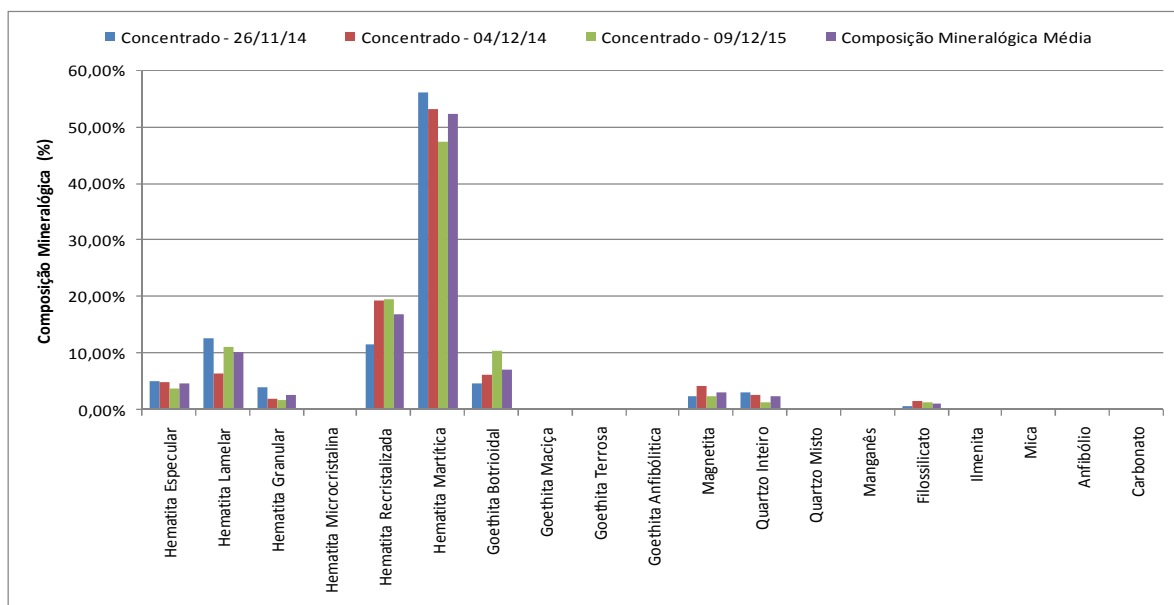


Figura 5. 15 - Composição Mineralógica Global das Amostras de Concentrado

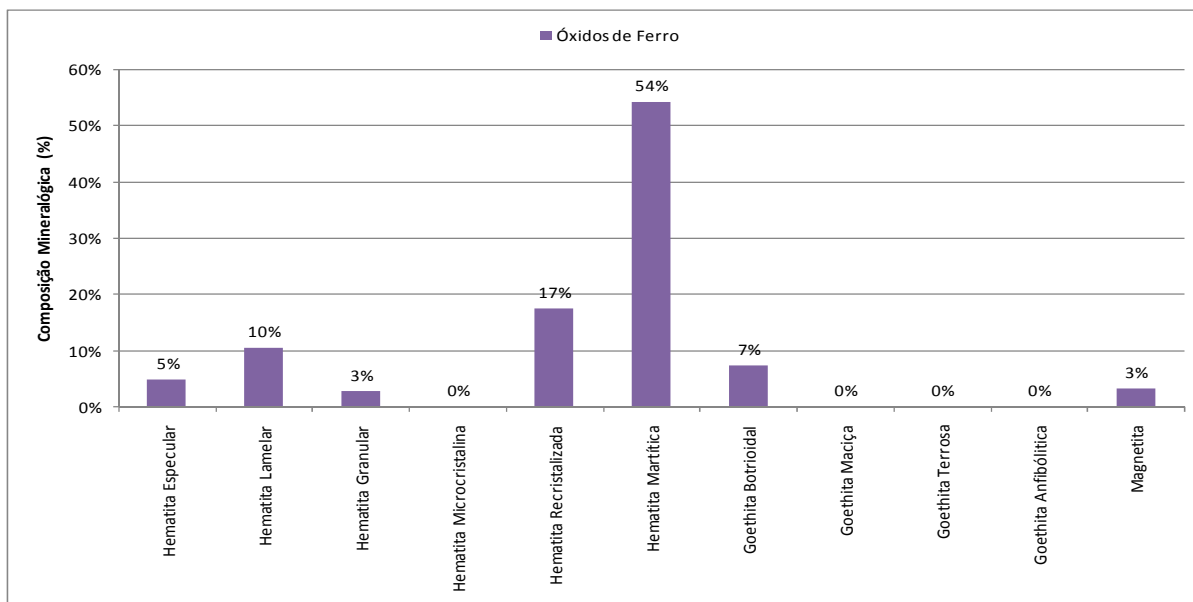


Figura 5. 16 - Composição Mineralógica dos Óxidos de Ferro das Amostras de Concentrado

5.1.3 - Caracterização Mineralógica das Amostras de Rejeito

Mineralogia Rejeito - Amostra 1 (26/11/14)

A tabela V.7 apresenta a mineralogia da amostra 1 do fluxo de rejeito.

Tabela V. 7 - Mineralogia da Amostra de Rejeito - 26/11/14

Mineralogia com Percentagem em Peso	
Hematita Especular	4,05%
Hematita Lamelar	10,52%
Hematita Granular	3,78%
Hematita Microcristalina	0,00%
Hematita Recristalizada	9,71%
Hematita Martítica	7,02%
Goethita Botrioidal	20,18%
Goethita Maciça	0,00%
Goethita Terrosa	2,29%
Goethita Anfíbólica	0,45%
Magnetita	0,05%
Quartzo Inteiro	37,79%
Quartzo Misto	0,11%
Manganês	0,46%
Filossilicato	3,60%
Ilmenita	0,00%
Mica	0,00%
Anfíbólio	0,00%
Carbonato	0,00%
FECHAMENTO	100,01%
MINERAIS CONTADOS	540

As figuras 5.17 e 5.18, apresentam fotomicrografia da amostra 1 do fluxo de rejeito.

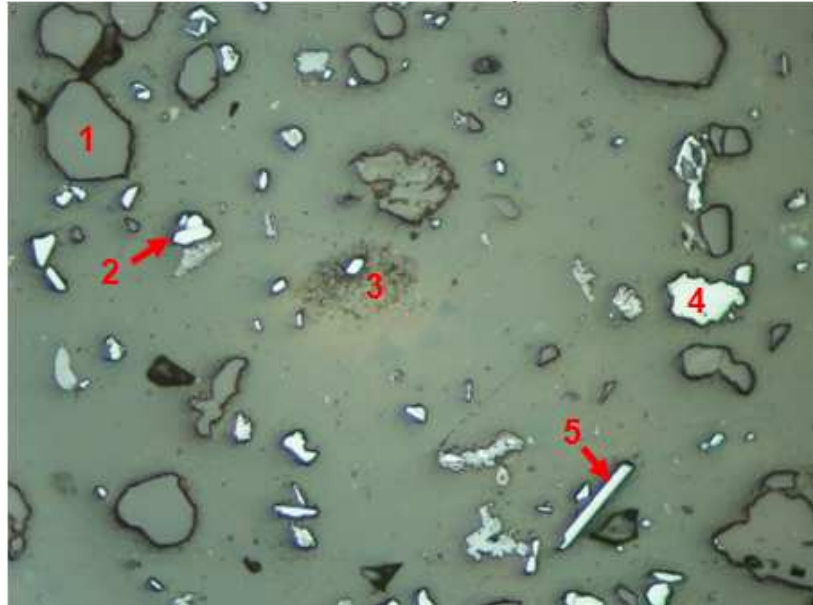


Figura 5. 17 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Rejeito - 26/11/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de quartzo inteiro (1), hematita lamelar (2), filossilicato carreando hematita lamelar (3), hematita recristalizada (4), hematita especular (5).

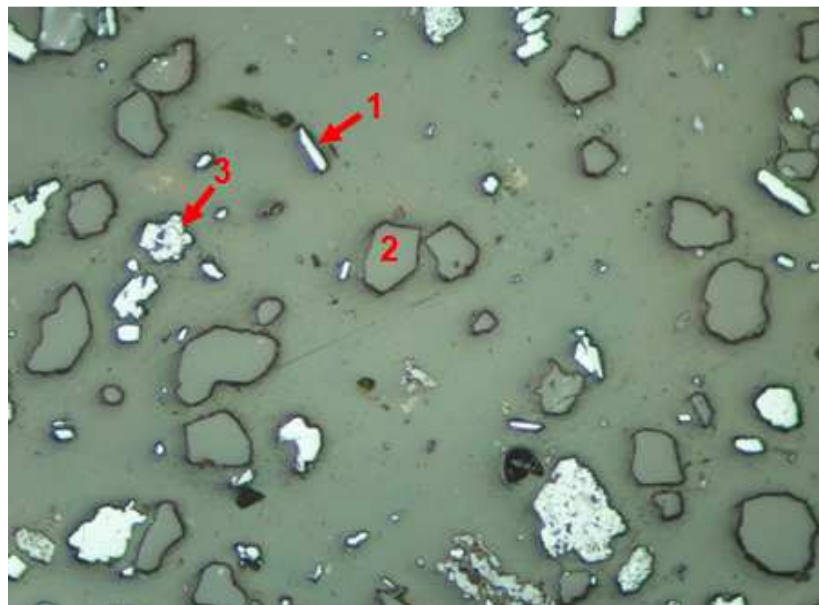


Figura 5. 18 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Rejeito - 26/11/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de hematita especular (1), quartzo inteiro (2), hematita martítica (3).

Mineralogia Rejeito - Amostra 2 (04/12/14)

A tabela V.8 apresenta a mineralogia da amostra 2 do fluxo de rejeito.

Tabela V. 8 - Mineralogia da Amostra de Rejeito - 04/12/14

Mineralogia com Percentagem em Peso	
Hematita Especular	2,15%
Hematita Lamelar	4,48%
Hematita Granular	1,18%
Hematita Microcristalina	0,00%
Hematita Recristalizada	8,89%
Hematita Martítica	5,45%
Goethita Botrioidal	16,04%
Goethita Maciça	0,00%
Goethita Terrosa	5,53%
Goethita Antibiótica	0,00%
Magnetita	0,23%
Quartzo Inteiro	51,16%
Quartzo Misto	0,65%
Manganês	0,24%
Filossilicato	4,00%
Ilmenita	0,00%
Mica	0,00%
Antibólio	0,00%
Carbonato	0,00%
FECHAMENTO	100,00%
MINERAIS CONTADOS	556

As figuras 5.19 e 5.20, apresentam fotomicrografia da amostra 2 do fluxo de rejeito.

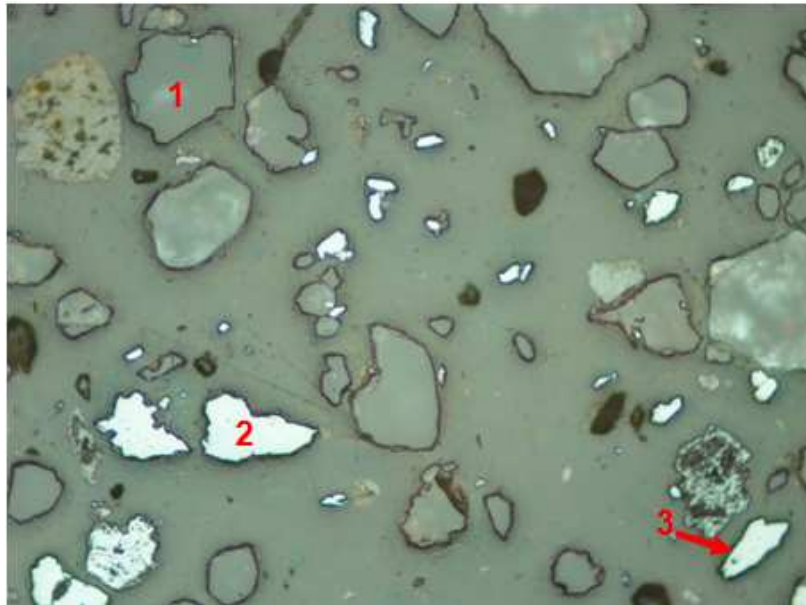


Figura 5. 19 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Rejeito - 04/12/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de quartzo inteiro (1), hematita recristalizada (2), hematita lamelar (3).

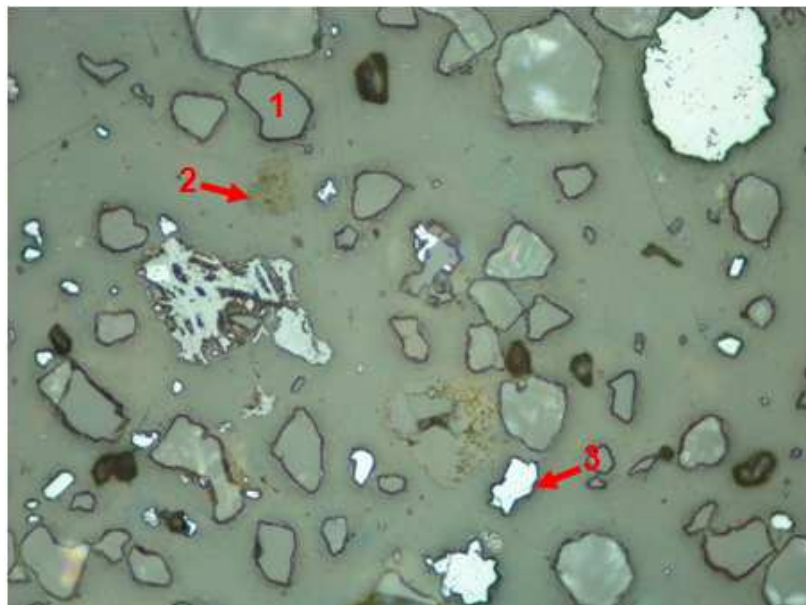


Figura 5. 20 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Rejeito - 04/12/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de quartzo inteiro (1), filossilicato (2), hematita recristalizada (3).

Mineralogia Rejeito - Amostra 3 (09/12/14)

A tabela V.9 apresenta a mineralogia da amostra 3 do fluxo de rejeito.

Tabela V. 9 - Mineralogia da Amostra de Rejeito - 09/12/14

Mineralogia com Percentagem em Peso	
Hematita Especular	3,44%
Hematita Lamelar	8,98%
Hematita Granular	0,29%
Hematita Microcristalina	0,00%
Hematita Recristalizada	7,16%
Hematita Martita	3,78%
Goethita Botrioidal	24,67%
Goethita Maciça	0,00%
Goethita Terrosa	1,99%
Goethita Antibólita	0,00%
Magnetita	0,06%
Quartzo Inteiro	41,79%
Quartzo Misto	1,27%
Manganês	0,29%
Filossilicato	6,29%
Ilmenita	0,00%
Mica	0,00%
Anfibólio	0,00%
Carbonato	0,00%
FECHAMENTO	100,01%
MINERAIS CONTADOS	534

As figuras 5.21 e 5.22, apresentam fotomicrografia da amostra 3 do fluxo de rejeito.



Figura 5. 21 - Fotomicrografia 1 da Amostra de Rejeito - 09/12/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de hematita martítica (1), hematita recristalizada (2), goethita botrioidal com inclusões de hematita martítica (3), hematita especular (4), quartzo inteiro (5).

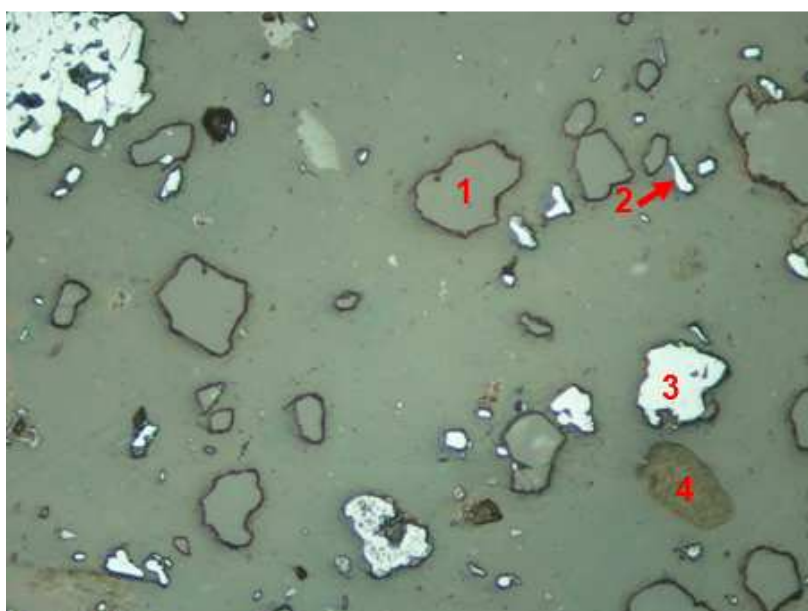


Figura 5. 22 - Fotomicrografia 2 da Amostra de Rejeito - 09/12/14

Pelo aspecto textural do minério, pode-se observar partículas constituídas de quartzo inteiro (1), hematita especular (2), hematita recristalizada (3), filossilicato (4).

Observa-se na figura 5.23, que as amostras de rejeito contêm todos os óxidos de ferro presentes nos fluxos de alimentação e concentrado. Deste total, destaca-se que 40% da população é constituída por goethita botrioidal, 17% por hematita recristalizada e 16% por hematita lamelar, conforme se pode observar na figura 5.24.

Nota-se que a goethita terrosa praticamente inexistente nas amostras de concentrado, se apresenta neste fluxo quase em sua totalidade quando comparado com a sua alimentação na concentração magnética.

Após a etapa Rougher, a rota de processo é constituída por duas etapas de concentração magnética do tipo carrossel (WHIMS) de alta intensidade denominadas Scavenger 1 e 2. Nota-se após a etapa final Scavenger 2, considerável perda de óxidos de ferro para o rejeito.

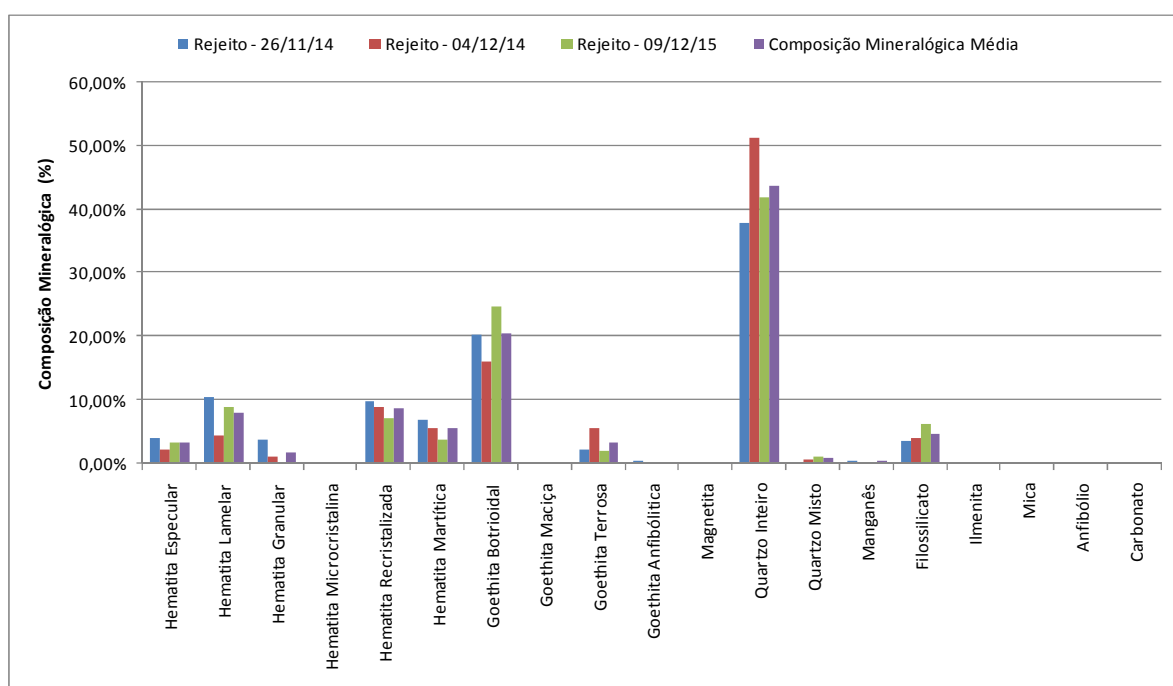


Figura 5. 23 - Composição Mineralógica Global das Amostras de Rejeito

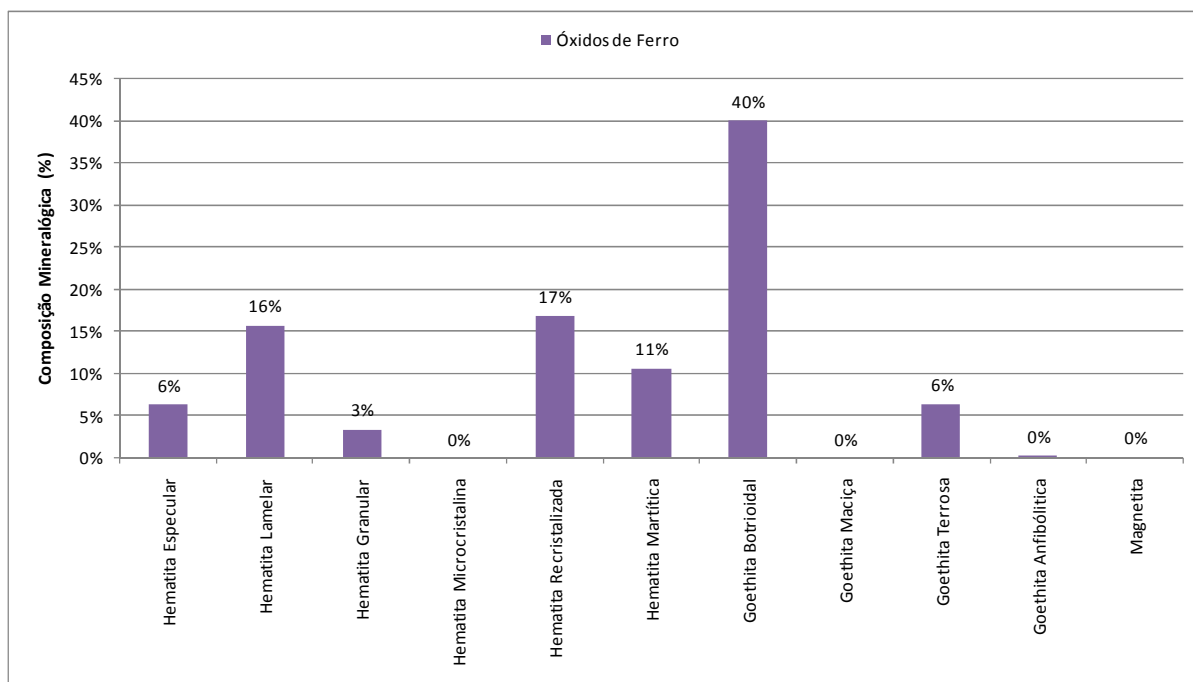


Figura 5. 24 - Composição Mineralógica dos Óxidos de Ferro das Amostras de Rejeito

5.2 - Caracterização Granulométrica das Amostras

Neste tópico serão abordados os resultados das análises granulométricas das amostras de alimentação, concentrado e rejeito da etapa de concentração magnética.

5.2.1 - Caracterização Granulométrica das Amostras de Alimentação

Observa-se na figura 5.25, que a distribuição granulométrica de ambas as amostras do fluxo de alimentação da concentração magnética apresentam similaridade. Encontra-se inserida na faixa de 0,010 mm a 0,150 mm 90% da massa e o d_{50} da ordem de 0,044 mm.

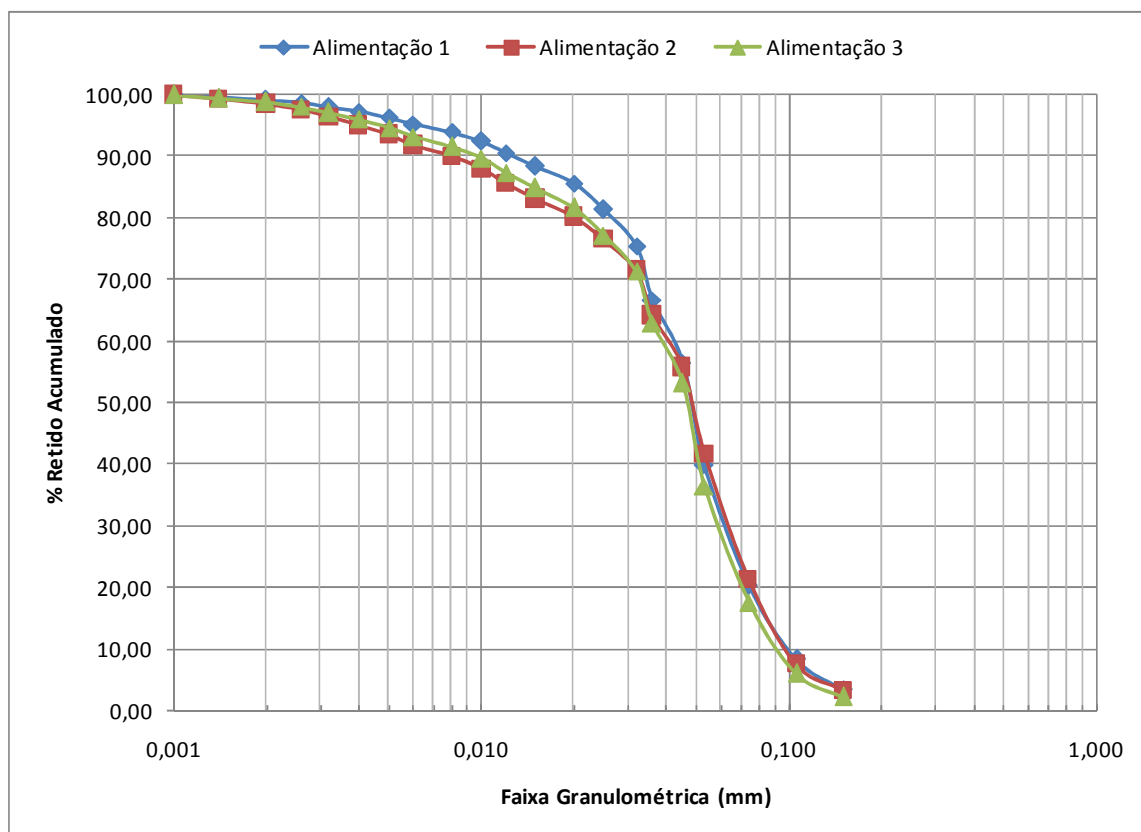


Figura 5. 25 - Curva Granulométrica Completa da Alimentação 1, 2 e 3

5.2.2 - Caracterização Granulométrica das Amostras de Concentrado

Já a distribuição granulométrica de ambas as amostras do fluxo concentrado, apresentam um d_{50} da ordem de 0,053 mm, onde aproximadamente 90% da massa encontra-se inserida na faixa de 0,032 mm a 0,150 mm, conforme se pode observar na figura 5.26.

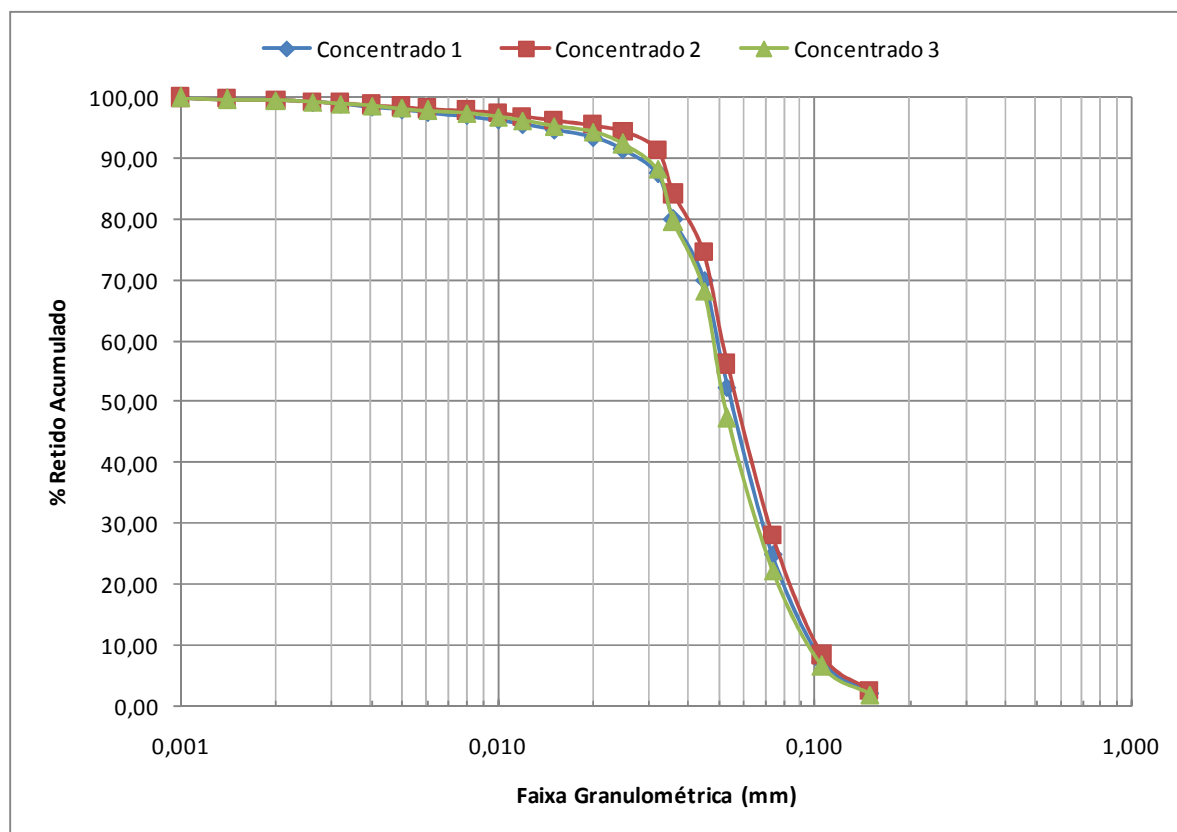


Figura 5. 26 - Curva Granulométrica Completa do Concentrado 1, 2 e 3

5.2.3 - Caracterização Granulométrica das Amostras de Rejeito

Observa-se no fluxo de rejeito, que as amostras 1 e 2 além de apresentarem uma distribuição granulométrica bastante semelhante, são ligeiramente mais grosseiras que a amostra 3. Enquanto que o d_{50} é da ordem de 0,053 mm e 90% da massa é retida na faixa de 0,008 mm, na amostra 3 o d_{50} é da ordem de 0,044 mm e 90% da massa é retido em 0,005 mm, conforme se observa na figura 5.27.

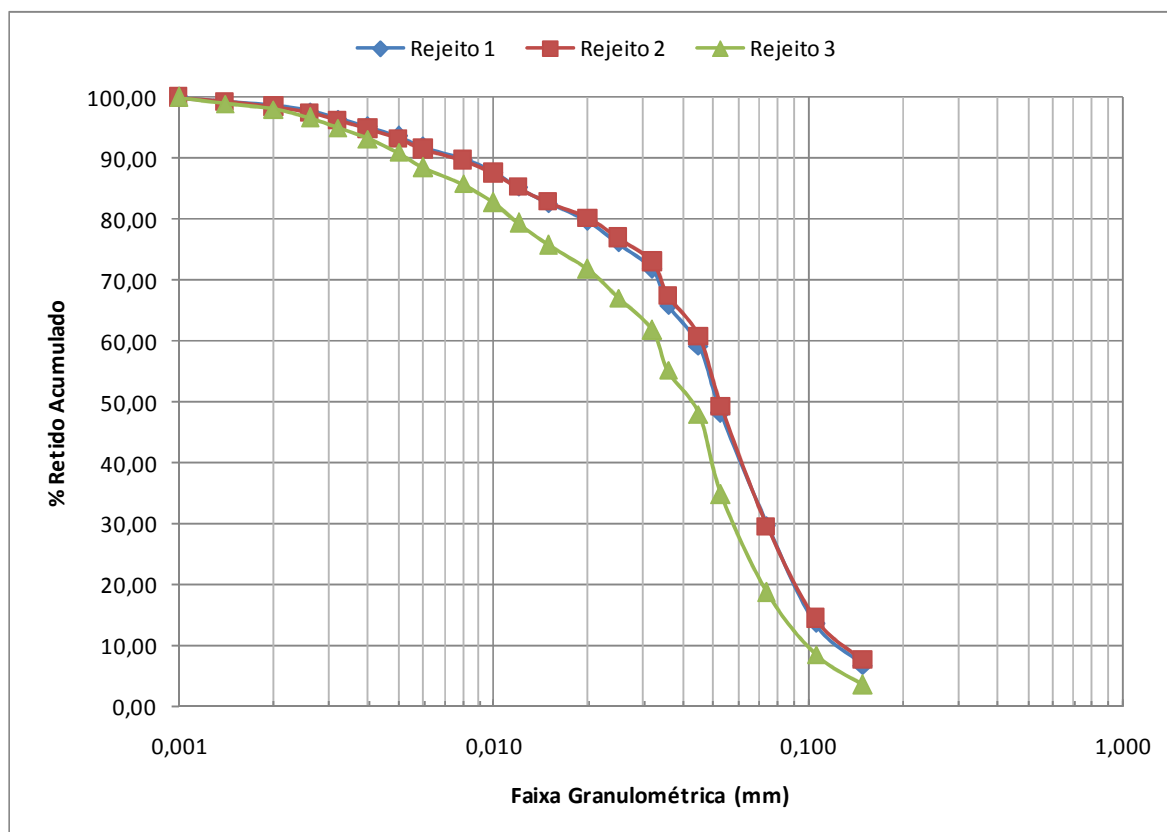


Figura 5. 27 - Curva Granulométrica Completa do Rejeito 1, 2 e 3

Verifica-se através da caracterização granulométrica que, entre 10% a 20% da massa total de ambas as amostras de alimentação, ou seja, todo o % abaixo de 0,010 mm encontra-se fora da faixa de trabalho para os métodos de concentração magnética aplicados na rota de processo estudada. Mesmo assim, uma pequena parte desta faixa é recuperada pelo concentrado, provavelmente pela atuação da força de arraste hidrodinâmico.

5.3 - Grau de Liberação das Amostras

Será abordado neste tópico, os resultados do grau de liberação das amostras de alimentação, concentrado e rejeito da etapa de concentração magnética.

5.3.1 - Grau de Liberação das Amostras de Alimentação

Observa-se na tabela V.10, um alto grau de liberação para os óxidos/hidróxidos de ferro e minerais de ganga na faixa granulométrica abaixo de 0,075 mm, intermediário entre - 0,150 mm e + 0,075 mm e baixo para a faixa acima de 0,150 mm.

Tabela V. 10 - Grau de Liberação Amostras de Alimentação

Amostra 1 26/11/2014	Faixa Granulométrica	Óxidos/Hidróxidos de ferro (%)	Ganga (%)
	+ 0,150 mm	49,85	59,55
	– 0,150 mm + 0,075 mm	88,00	86,67
	– 0,075 mm + 0,045 mm	96,87	95,34
	– 0,045 mm	99,79	99,05
Amostra 2 04/12/2014	Faixa Granulométrica	Óxidos/Hidróxidos de ferro (%)	Ganga (%)
	+ 0,150 mm	47,92	63,86
	– 0,150 mm + 0,075 mm	73,41	79,22
	– 0,075 mm + 0,045 mm	95,59	97,30
	– 0,045 mm	99,64	99,13
Amostra 3 09/12/2014	Faixa Granulométrica	Óxidos/Hidróxidos de ferro (%)	Ganga (%)
	+ 0,150 mm	58,25	69,52
	– 0,150 mm + 0,075 mm	76,23	76,70
	– 0,075 mm + 0,045 mm	94,22	94,50
	– 0,045 mm	99,16	98,22

5.3.2 - Grau de Liberação das Amostras de Concentrado

Na tabela V.11, observa-se alto grau de liberação para os óxidos/hidróxidos de ferro e minerais de ganga abaixo da faixa de 0,150 mm e de baixo a intermediário para a faixa acima de 0,150 mm.

Tabela V. 11 - Grau de Liberação Amostras de Concentrado

Amostra 1 26/11/2014	Faixa Granulométrica	Óxidos/Hidróxidos de ferro (%)	Ganga (%)
	+ 0,150 mm	58,81	31,01
	– 0,150 mm + 0,075 mm	89,83	64,63
	– 0,075 mm + 0,045 mm	99,20	88,79
	– 0,045 mm	99,83	99,38
Amostra 2 04/12/2014	Faixa Granulométrica	Óxidos/Hidróxidos de ferro (%)	Ganga (%)
	+ 0,150 mm	74,12	43,62
	– 0,150 mm + 0,075 mm	93,66	67,57
	– 0,075 mm + 0,045 mm	97,50	91,15
	– 0,045 mm	99,15	91,18
Amostra 3 09/12/2014	Faixa Granulométrica	Óxidos/Hidróxidos de ferro (%)	Ganga (%)
	+ 0,150 mm	56,25	33,93
	– 0,150 mm + 0,075 mm	86,12	63,78
	– 0,075 mm + 0,045 mm	97,46	90,00
	– 0,045 mm	99,65	99,10

5.3.3 - Grau de Liberação das Amostras de Rejeito

Observa-se na tabela V.12, um grau de liberação de alto a intermediário para os óxidos/hidróxidos de ferro e minerais de ganga na faixa granulométrica abaixo de 0,075 mm, intermediário entre - 0,150 mm e + 0,075 mm, e de baixo a muito baixo para a faixa acima de 0,150 mm.

Tabela V. 12 - Grau de Liberação Amostras de Rejeito

Amostra 1 26/11/2014	Faixa Granulométrica	Óxidos/Hidróxidos de ferro (%)	Ganga (%)
	+ 0,150 mm	57,84	66,11
	- 0,150 mm + 0,075 mm	64,44	75,11
	- 0,075 mm + 0,045 mm	95,19	97,25
	- 0,045 mm	98,92	98,95
Amostra 2 04/12/2014	Faixa Granulométrica	Óxidos/Hidróxidos de ferro (%)	Ganga (%)
	+ 0,150 mm	46,85	70,55
	- 0,150 mm + 0,075 mm	71,70	89,17
	- 0,075 mm + 0,045 mm	84,93	93,91
	- 0,045 mm	99,01	99,38
Amostra 3 09/12/2014	Faixa Granulométrica	Óxidos/Hidróxidos de ferro (%)	Ganga (%)
	+ 0,150 mm	28,20	65,98
	- 0,150 mm + 0,075 mm	54,90	79,33
	- 0,075 mm + 0,045 mm	78,21	92,99
	- 0,045 mm	99,36	99,56

Ressalta-se que o grau de liberação das amostras de alimentação da concentração magnética é oriundo da característica natural do minério. O percentual mássico com baixo grau de liberação presentes na fração acima de 0,150mm é em torno de 3%, descartando-se a necessidade de utilização de métodos de cominuição.

Nota-se no concentrado que, a fração com baixo grau de liberação representa cerca de 2% da massa, e não compromete a especificação comercial. Observa-se nas amostras de rejeito níveis semelhantes de grau de liberação comparado com as amostras de alimentação, porém o percentual mássico não liberado é da ordem de 35%, onde numa eventual tentativa de recuperação destes óxidos de ferro, deve-se realizar um estudo preliminar de liberação levando-se em consideração este percentual.

5.4 - Caracterização Química das Amostras

Será abordado neste tópico, os resultados da análise química das amostras de alimentação, concentrado e rejeito da etapa de concentração magnética.

5.4.1 - Caracterização Granuloquímica das Amostras de Alimentação

Observa-se nas tabelas V.13, V.14 e V.15 que, a alimentação (amostra 1) é mais rica que as demais alimentações (amostras 2 e 3). Entretanto, as 3 amostras apresentam-se comportamento semelhantes para o teor de ferro, empobrecendo para a fração + 0,150 mm, estável para a fração - 0,150 mm a + 0,037 mm, e enriquecendo para a fração - 0,037 mm.

Já os teores de SiO₂, apresentam-se valores elevados na faixa + 0,150 mm e na faixa entre - 0,053 e + 0,044 mm. A partir de - 0,044 mm, os teores de SiO₂ decresce a medida que decresce a faixa granulométrica, chegando a valores inferiores a 10% na faixa - 0,020 mm.

Tabela V. 13 - Análise Granuloquímica Alimentação - Amostra 1 - 26/11/14

	(%) Retido	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	PPC	FeO
Amostra cabeça	-	57,30	14,82	1,09	0,058	0,22	0,05	0,09	0,09	0,02	2,06	0,63
Amostra cabeça calculada	-	57,45	14,67	1,02	0,055	0,20	0,05	0,09	0,08	0,02	1,89	0,80
Am. + 0,150 mm	3,34	48,56	20,79	3,15	0,110	0,85	0,05	0,08	0,14	0,03	5,64	0,09
Am. - 0,150 mm + 0,106 mm	5,24	55,65	15,68	1,40	0,072	0,39	0,06	0,09	0,09	0,02	3,10	0,19
Am. - 0,106 mm + 0,074 mm	11,73	56,37	16,30	0,84	0,052	0,22	0,05	0,10	0,07	0,02	1,97	0,80
Am. - 0,074 mm + 0,053 mm	18,97	56,05	17,92	0,64	0,043	0,14	0,05	0,10	0,05	0,02	1,36	1,45
Am. 0,053 mm + 0,044 mm	9,98	55,47	18,50	0,59	0,043	0,13	0,05	0,10	0,06	0,02	1,33	1,14
Am. - 0,044 mm + 0,037 mm	8,89	54,21	20,05	0,65	0,044	0,13	0,05	0,09	0,06	0,02	1,42	0,98
Am. - 0,037 mm + 0,025 mm	16,36	57,36	15,97	0,64	0,052	0,13	0,07	0,09	0,07	0,02	1,23	0,84
Am. - 0,025 mm + 0,020 mm	5,22	60,90	10,13	0,70	0,046	0,15	0,05	0,08	0,09	0,02	1,60	0,65
Am. - 0,020 mm	20,26	62,88	5,29	1,79	0,069	0,22	0,05	0,07	0,15	0,03	2,50	0,24

Tabela V. 14 - Análise Granuloquímica Alimentação - Amostra 2- 04/12/14

	(%) Retido	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	PPC	FeO
Amostra cabeça	-	51,26	23,17	1,07	0,061	0,22	0,05	0,09	0,08	0,02	2,36	0,46
Amostra cabeça calculada	-	51,36	22,30	1,06	0,059	0,21	0,05	0,09	0,08	0,03	2,26	0,61
Am. + 0,150 mm	3,10	42,90	27,42	2,74	0,112	0,68	0,05	0,09	0,10	0,04	6,01	0,05
Am. - 0,150 mm + 0,106 mm	4,84	50,40	21,45	1,33	0,079	0,39	0,05	0,09	0,08	0,02	3,51	0,18
Am. - 0,106 mm + 0,074 mm	12,46	52,22	21,09	0,79	0,055	0,21	0,05	0,09	0,06	0,02	2,14	0,62
Am. - 0,074 mm + 0,053 mm	20,02	51,22	23,92	0,56	0,045	0,13	0,05	0,09	0,05	0,02	1,44	0,97
Am. 0,053 mm + 0,044 mm	8,54	50,26	27,15	0,53	0,040	0,12	0,05	0,09	0,05	0,02	1,39	0,93
Am. - 0,044 mm + 0,037 mm	9,55	49,86	28,24	0,55	0,042	0,12	0,05	0,08	0,05	0,02	1,40	0,82
Am. - 0,037 mm + 0,025 mm	17,56	47,88	27,66	0,60	0,047	0,12	0,05	0,08	0,06	0,02	1,56	0,64
Am. - 0,025 mm + 0,020 mm	5,58	52,19	21,79	0,66	0,048	0,14	0,05	0,08	0,08	0,02	1,78	0,60
Am. - 0,020 mm	18,34	56,99	10,40	2,49	0,093	0,37	0,05	0,10	0,16	0,06	3,96	0,13

Tabela V. 15 - Análise Granuloquímica Alimentação - Amostra 3 - 09/12/14

	(%) Retido	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	PPC	FeO
Amostra cabeça	-	50,94	23,95	1,20	0,059	0,19	0,05	0,08	0,09	0,02	2,23	0,38
Amostra cabeça calculada	-	50,76	22,60	1,17	0,056	0,19	0,02	0,08	0,09	0,03	2,04	0,53
Am. + 0,150 mm	2,24	42,05	28,45	3,37	0,110	0,53	0,05	0,09	0,13	0,03	5,94	0,06
Am. - 0,150 mm + 0,106 mm	4,10	47,32	25,04	1,61	0,074	0,34	0,02	0,08	0,09	0,02	3,51	0,24
Am. - 0,106 mm + 0,074 mm	11,75	49,74	24,29	0,87	0,050	0,19	0,02	0,08	0,06	0,02	2,02	0,61
Am. - 0,074 mm + 0,053 mm	19,28	48,45	26,91	0,62	0,040	0,12	0,01	0,08	0,06	0,02	1,34	0,91
Am. 0,053 mm + 0,044 mm	7,52	46,26	30,61	0,57	0,038	0,11	0,01	0,08	0,06	0,02	1,31	0,86
Am. - 0,044 mm + 0,037 mm	10,78	47,29	28,75	0,57	0,038	0,12	0,01	0,07	0,06	0,02	1,30	0,67
Am. - 0,037 mm + 0,025 mm	15,41	47,57	28,38	0,60	0,041	0,12	0,01	0,07	0,07	0,02	1,39	0,55
Am. - 0,025 mm + 0,020 mm	6,04	54,14	18,69	0,64	0,044	0,13	0,01	0,06	0,08	0,02	1,47	0,48
Am. - 0,020 mm	22,88	59,09	8,67	2,52	0,091	0,30	0,01	0,08	0,16	0,06	3,15	0,09

5.4.2 - Caracterização Granuloquímica das Amostras de Concentrado

Verifica-se nas tabelas V.16, V.17 e V.18 que, os teores de ferro das amostras eleva-se a medida que decresce a faixa granulométrica, exceto para amostra 1. Mesma observação, porém ao contrário, para os teores de SiO₂, onde a medida em que decresce a faixa granulométrica abaixa-se o teor, chegando a patamares inferiores a 3,5% de SiO₂ para as faixas abaixo de - 0,150mm, exceto para amostra 2, que entre a faixa 0,150mm a 0,106mm apresenta teor de 4,3% de SiO₂.

Analisando-se isoladamente os teores de SiO₂ para as faixas superiores a 0,150mm totalizando aproximadamente 2,0% da massa total, teoricamente estariam fora de especificação comercial que atualmente corresponde a 4,0% de SiO₂, porém estes não vieram comprometer a especificação comercial global.

Tabela V. 16 - Análise Granuloquímica Concentrado - Amostra 1 - 26/11/14

	(%) Retido	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	PPC	FeO
Amostra cabeça	-	67,05	2,36	0,44	0,043	0,13	0,05	0,10	0,06	0,02	1,26	1,20
Amostra cabeça calculada	-	67,02	2,34	0,43	0,039	0,13	0,05	0,10	0,05	0,02	1,11	1,23
Am. + 0,150 mm	2,06	60,36	6,69	1,71	0,083	0,53	0,05	0,10	0,10	0,02	3,87	0,26
Am. - 0,150 mm + 0,106 mm	5,62	65,06	3,55	0,77	0,051	0,27	0,05	0,10	0,06	0,02	2,21	0,93
Am. - 0,106 mm + 0,074 mm	16,58	66,82	2,38	0,46	0,042	0,16	0,05	0,11	0,05	0,02	1,37	1,35
Am. - 0,074 mm + 0,053 mm	27,62	67,51	1,89	0,35	0,038	0,10	0,05	0,11	0,04	0,02	0,86	1,53
Am. 0,053 mm + 0,044 mm	11,51	67,63	1,94	0,32	0,034	0,09	0,05	0,11	0,04	0,02	0,79	1,42
Am. - 0,044 mm + 0,037 mm	10,54	67,10	2,39	0,34	0,035	0,10	0,05	0,10	0,05	0,02	0,99	1,19
Am. - 0,037 mm + 0,025 mm	14,10	67,14	2,58	0,34	0,037	0,10	0,05	0,09	0,05	0,02	0,84	1,01
Am. - 0,025 mm + 0,020 mm	3,80	66,91	2,27	0,38	0,036	0,11	0,05	0,08	0,07	0,02	1,05	0,88
Am. - 0,020 mm	8,17	67,71	1,93	0,51	0,038	0,10	0,05	0,06	0,09	0,02	1,13	0,76

Tabela V. 17 - Análise Granuloquímica Concentrado - Amostra 2 - 04/12/14

	(%) Retido	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	PPC	FeO
Amostra cabeça	-	66,44	3,40	0,39	0,040	0,10	0,05	0,11	0,05	0,02	1,14	1,34
Amostra cabeça calculada	-	66,15	3,29	0,37	0,039	0,09	0,05	0,10	0,05	0,02	0,97	1,40
Am. + 0,150 mm	2,30	58,88	8,48	1,64	0,086	0,45	0,05	0,11	0,08	0,02	3,88	0,32
Am. - 0,150 mm + 0,106 mm	6,74	64,64	4,31	0,66	0,053	0,16	0,05	0,11	0,05	0,02	1,72	1,31
Am. - 0,106 mm + 0,074 mm	19,17	65,92	3,36	0,39	0,038	0,09	0,05	0,10	0,04	0,02	1,06	1,54
Am. - 0,074 mm + 0,053 mm	28,39	66,44	3,19	0,30	0,037	0,07	0,05	0,11	0,04	0,02	0,80	1,69
Am. 0,053 mm + 0,044 mm	10,19	66,58	3,10	0,29	0,033	0,07	0,05	0,11	0,04	0,02	0,73	1,54
Am. - 0,044 mm + 0,037 mm	12,00	66,60	3,19	0,29	0,035	0,07	0,05	0,10	0,05	0,02	0,74	1,35
Am. - 0,037 mm + 0,025 mm	13,57	66,97	2,58	0,27	0,035	0,07	0,05	0,09	0,05	0,02	0,72	1,06
Am. - 0,025 mm + 0,020 mm	2,94	66,96	2,59	0,27	0,035	0,07	0,05	0,08	0,05	0,02	0,73	1,11
Am. - 0,020 mm	4,70	66,21	2,85	0,49	0,039	0,10	0,05	0,07	0,07	0,02	1,06	0,72

Tabela V. 18 - Análise Granuloquímica Concentrado - Amostra 3 - 09/12/14

	(%) Retido	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	PPC	FeO
Amostra cabeça	-	66,92	2,74	0,41	0,043	0,11	0,05	0,10	0,063	0,02	1,24	1,14
Amostra cabeça calculada	-	66,69	2,72	0,44	0,039	0,11	0,03	0,10	0,066	0,02	1,14	1,22
Am. + 0,150 mm	1,91	61,30	5,92	1,47	0,081	0,40	0,01	0,12	0,110	0,02	3,73	0,69
Am. - 0,150 mm + 0,106 mm	5,53	65,11	3,53	0,68	0,055	0,22	0,01	0,11	0,071	0,02	2,11	1,19
Am. - 0,106 mm + 0,074 mm	16,09	66,12	3,22	0,45	0,043	0,14	0,01	0,11	0,057	0,02	1,36	1,46
Am. - 0,074 mm + 0,053 mm	25,64	66,80	3,06	0,42	0,038	0,10	0,04	0,11	0,059	0,02	1,05	1,46
Am. 0,053 mm + 0,044 mm	10,46	66,89	2,81	0,39	0,037	0,10	0,04	0,11	0,061	0,02	0,97	1,42
Am. - 0,044 mm + 0,037 mm	12,04	67,21	2,28	0,36	0,034	0,09	0,03	0,10	0,062	0,02	0,94	1,18
Am. - 0,037 mm + 0,025 mm	17,11	67,27	2,06	0,34	0,033	0,09	0,04	0,09	0,068	0,02	0,89	0,94
Am. - 0,025 mm + 0,020 mm	3,95	67,64	1,79	0,36	0,031	0,08	0,04	0,07	0,077	0,02	0,76	0,85
Am. - 0,020 mm	7,27	67,22	1,61	0,54	0,037	0,10	0,04	0,06	0,092	0,02	0,96	0,65

5.4.3 - Caracterização Granuloquímica das Amostras de Rejeito

Observa-se nas tabelas V.19, V.20 e V.21 que, os teores de ferro varia de 30% a 48% entre as faixas 0,150 mm a 0,020 mm, chegando a 56% Fe abaixo de 0,020 mm. Estes altos teores de ferro no rejeito podem estar associados a baixa performance da concentração magnética para a faixa granulométrica menor que 0,020 mm, alto grau de liberação e mineralogia associados.

Tabela V. 19 - Análise Granuloquímica Rejeito - Amostra 1 - 26/11/14

	(%) Retido	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	PPC	FeO
Amostra cabeça	-	37,93	40,58	1,87	0,072	0,37	0,05	0,06	0,11	0,03	3,01	0,06
Amostra cabeça calculada	-	38,04	40,71	1,70	0,062	0,32	0,05	0,05	0,10	0,03	2,74	0,06
Am. + 0,150 mm	6,36	40,32	29,75	4,12	0,123	1,01	0,05	0,08	0,15	0,05	6,48	0,05
Am. - 0,150 mm + 0,106 mm	7,57	43,16	31,39	2,05	0,080	0,54	0,05	0,06	0,10	0,03	4,03	0,06
Am. - 0,106 mm + 0,074 mm	15,11	38,83	40,04	1,32	0,049	0,34	0,05	0,05	0,08	0,02	2,46	0,06
Am. - 0,074 mm + 0,053 mm	19,08	30,38	53,91	1,02	0,042	0,23	0,05	0,05	0,06	0,02	1,79	0,05
Am. 0,053 mm + 0,044 mm	8,17	26,33	60,14	0,90	0,042	0,02	0,05	0,04	0,06	0,02	1,67	0,06
Am. - 0,044 mm + 0,037 mm	8,33	26,75	59,41	1,03	0,043	0,22	0,05	0,04	0,07	0,02	1,82	0,05
Am. - 0,037 mm + 0,025 mm	13,72	32,24	51,49	0,97	0,047	0,20	0,05	0,05	0,08	0,02	1,91	0,06
Am. - 0,025 mm + 0,020 mm	3,89	44,71	32,04	0,91	0,051	0,21	0,05	0,05	0,10	0,02	1,94	0,09
Am. - 0,020 mm	17,77	56,29	10,87	3,17	0,096	0,38	0,05	0,07	0,19	0,04	3,86	0,09

Tabela V. 20 - Análise Granuloquímica Rejeito - Amostra 2 - 04/12/14

	(%) Retido	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	PPC	FeO
Amostra cabeça	-	26,50	57,80	1,59	0,069	0,27	0,05	0,06	0,07	0,04	2,82	0,23
Amostra cabeça calculada	-	26,43	56,44	1,63	0,059	0,26	0,03	0,06	0,07	0,04	2,62	0,13
Am. + 0,150 mm	7,13	33,58	38,53	3,46	0,110	0,70	0,05	0,08	0,10	0,04	6,29	0,16
Am. - 0,150 mm + 0,106 mm	7,50	32,02	45,25	1,83	0,081	0,41	0,05	0,06	0,07	0,03	3,83	0,07
Am. - 0,106 mm + 0,074 mm	15,00	26,87	58,62	1,05	0,050	0,21	0,05	0,05	0,05	0,02	2,21	0,06
Am. - 0,074 mm + 0,053 mm	19,88	20,21	66,62	1,14	0,019	0,11	0,05	0,06	0,05	0,04	1,36	0,08
Am. 0,053 mm + 0,044 mm	8,15	16,42	74,36	0,62	0,029	0,10	0,01	0,04	0,03	0,02	1,14	0,36
Am. - 0,044 mm + 0,037 mm	9,37	16,61	75,02	0,65	0,033	0,10	0,01	0,04	0,03	0,02	1,16	0,22
Am. - 0,037 mm + 0,025 mm	15,73	18,84	69,24	0,76	0,039	0,13	0,03	0,04	0,05	0,02	1,48	0,06
Am. - 0,025 mm + 0,020 mm	2,94	28,28	54,91	0,96	0,053	0,18	0,02	0,05	0,07	0,02	2,00	0,49
Am. - 0,020 mm	14,30	48,22	18,71	4,19	0,144	0,59	0,02	0,12	0,21	0,12	5,55	0,11

Tabela V. 21 - Análise Granuloquímica Rejeito - Amostra 3 - 09/12/14

	(%) Retido	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	PPC	FeO
Amostra cabeça	-	32,49	47,51	2,48	0,076	0,30	0,05	0,08	0,13	0,11	3,53	0,05
Amostra cabeça calculada	-	32,57	46,15	2,48	0,081	0,32	0,04	0,07	0,12	0,04	3,41	0,10
Am. + 0,150 mm	3,59	36,52	34,28	4,36	0,119	0,66	0,05	0,09	0,13	0,04	6,74	0,09
Am. - 0,150 mm + 0,106 mm	5,09	37,29	37,33	2,52	0,084	0,46	0,04	0,07	0,10	0,03	4,49	0,08
Am. - 0,106 mm + 0,074 mm	10,91	32,60	48,01	1,64	0,059	0,29	0,04	0,06	0,08	0,02	2,84	0,09
Am. - 0,074 mm + 0,053 mm	16,20	23,81	61,53	1,14	0,040	0,17	0,04	0,05	0,06	0,02	1,87	0,12
Am. 0,053 mm + 0,044 mm	6,93	19,48	69,55	1,02	0,035	0,14	0,04	0,05	0,05	0,02	1,63	0,23
Am. - 0,044 mm + 0,037 mm	8,04	19,44	69,80	1,07	0,037	0,14	0,05	0,05	0,05	0,02	1,70	0,12
Am. - 0,037 mm + 0,025 mm	15,09	21,95	64,32	1,20	0,044	0,17	0,04	0,05	0,07	0,02	2,03	0,06
Am. - 0,025 mm + 0,020 mm	5,64	30,61	51,74	1,35	0,051	0,21	0,04	0,05	0,09	0,02	2,40	0,08
Am. - 0,020 mm	28,50	49,09	16,68	4,96	0,158	0,55	0,05	0,12	0,23	0,10	5,72	0,07

Observa-se que 80% da massa da alimentação da concentração magnética contida entre as faixas 0,150mm a 0,025 mm, apresenta teores médios de 50% de Fe e 24% de SiO₂. O restante da massa contida abaixo de 0,025mm que apresenta teor médio de 58% de Fe e 14% de SiO₂, teoricamente só favorece a elevação do teor global de Fe e diminuição do teor global da SiO₂ tanto na alimentação quanto no rejeito, já que a partir desta faixa a concentração magnética estudada começa a perder eficiência, em função do limite granulométrico de trabalho do equipamento.

Todavia, as características químicas de alimentação aliados aos ajustes das variáveis de projeto e processo, permitem obter um produto com teor de até 67% de Fe e 3,8% de SiO₂, exceto para faixa superior a 0,150mm, onde nestas amostras chegou-se não atingir a especificação química comercial, devido ao baixo grau de liberação.

5.5 - Recuperação Mássica e Metalúrgica

A figura 5.28, apresenta-se a performance para a recuperação mássica global e por faixa granulométrica. Nota-se que, pela média global das 3 amostras a recuperação mássica encontra-se na ordem de pouco mais de 60%.

Observa-se que a recuperação mássica mais expressiva (em torno de 65%), encontra-se compreendida na faixa granulométrica entre - 0,074 mm a + 0,020 mm. Acima de 0,074 mm e abaixo de 0,020 mm a recuperação mássica apresenta valores inferiores a 55%.

Nota-se que recuperação mássica global e por faixa apesar de comportarem de maneira semelhante, apresenta patamares diferentes. A variação de patamares pode-se estar associada além dos teores de alimentação da concentração magnética, também pela composição mineralógica de cada litologia, grau de liberação das partículas e sua distribuição granulométrica. Neste sentido, sem este conhecimento prévio, os ajustes das variáveis de processo do conjunto de equipamentos da concentração magnética, torna-se vulneráveis.

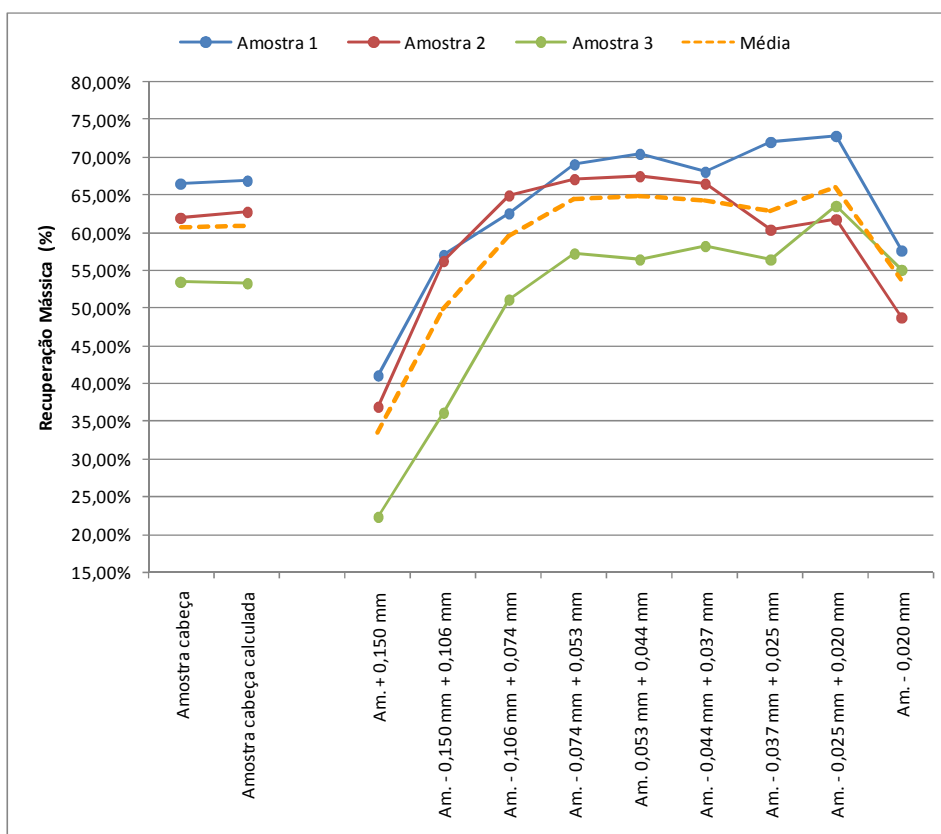


Figura 5. 28 - Recuperação Mássica Global e por Faixa

Já a recuperação metalúrgica observada na figura 5.29, apresenta-se uma recuperação global na ordem de 76%. Nota-se que a recuperação metalúrgica mais expressiva (em torno de 83%), encontra-se compreendida na faixa granulométrica entre - 0,074 mm a + 0,020 mm, acompanhando a mesma faixa da melhor recuperação mássica. Acima de 0,074 mm e abaixo de 0,020 mm a recuperação metalúrgica apresenta valores da ordem de 60%.

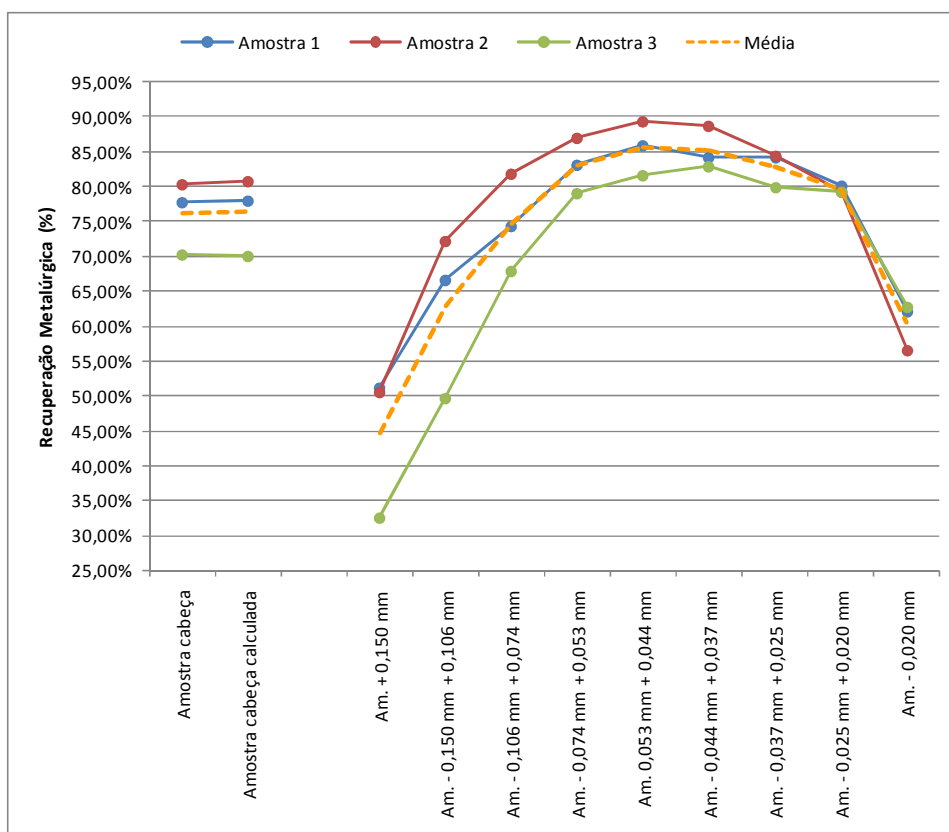


Figura 5. 29 - Recuperação Metalúrgica Global e por Faixa

A máxima recuperação mássica e metalúrgica observada nas figuras 5.28 e 5.29, provavelmente encontra-se associadas ao menor percentual granulométrico na fração menor que 0,020mm, somado há uma maior presença da hematita martítica e menor da goethita botrioidal, observadas na Amostra 1. Por outro lado, a mínima recuperação mássica e metalúrgica ocorreu na inversão da faixa granulométrica e proporção dos minerais descritos acima.

6 - CONCLUSÕES

Quanto à mineralogia, as amostras apresentaram certa homogeneidade e/ou semelhança dos minerais, ou seja, todos os minerais identificados na análise mineralógica, encontraram-se presentes e praticamente com os mesmos percentuais quando comparados entre cada amostra de alimentação, concentrado e rejeito. Apenas a goethita terrosa das amostras de concentrado, cuja presença comparada às amostras de alimentação e rejeito, é praticamente desprezível.

Os óxidos e hidróxidos de ferro são os mais abundantes nas amostras de alimentação. Isto é proporcionado pela presença da hematita martítica, seguida pela goethita botrioidal, hematita recristalizada e hematita lamelar. Nas amostras de concentrado, o destaque é para hematita martítica, seguida pela hematita recristalizada e hematita lamelar. Já nas amostras de rejeito, destaca a goethita botrioidal.

O grau de liberação apresentou bastante semelhança nas faixas estudadas, tanto para as amostras de alimentação, concentrado e rejeito. Destaca-se o grau de liberação da ordem de 97% para a faixa menor que 0,075 mm nas amostras de alimentação, compreendendo 80% da massa total que alimenta o circuito da concentração magnética. Dos 20% restantes, 17% tem grau de liberação de 80% para faixa entre 0,075 a 0,150 mm, e 3% tem grau de liberação de 64% acima de 0,150 mm.

As granulometrias de todas as amostras de alimentação, concentrado e rejeito apresentaram praticamente o mesmo comportamento quando comparadas entre si. Observou-se que 80% da massa da alimentação e rejeito encontra-se distribuída até 0,020 mm, já no concentrado até 0,036 mm. O d_{50} do concentrado e rejeito é da ordem de 0,053 mm, e na alimentação da ordem de 0,044 mm.

A granuloquímica permitiu identificar que tanto para as amostras de alimentação, quanto para concentrado, há um enriquecimento do teor de ferro a medida que decresce a faixa granulométrica, enquanto que no rejeito, há um empobrecimento do teor de ferro ao caminhar de 0,106 mm a 0,037 mm. Após esta faixa, inicia-se um enriquecimento chegando ao patamar de 50% de Fe abaixo de 0,020 mm.

A recuperação mássica global mostrou melhor performance na amostra 1 (66,7%), comparado a amostra 2 (62,4%) e (53,3%) amostra 3. Já a recuperação metalúrgica, obteve a melhor performance na amostra 2 (80,6%), comparado a amostra 1 (78%) e (70,2%) amostra 3.

No geral, apesar da variação em termos de tipologia e seu % de participação na composição do ROM, não há desaparecimento ou variação brusca dos minerais presentes em ambos os fluxos analisados. Da mesma maneira, a distribuição granulométrica e o grau de liberação caracterizados apresentam comportamento bem definidos. Os teores de ferro apresentam tendência de enriquecimento na alimentação e concentrado à medida que descesse a faixa granulométrica.

Assim, pode-se dizer que os estudos de caracterização do minério é extremamente importante tanto na fase inicial de conhecimento da jazida, quanto no decorrer do desenvolvimento da lavra e nos processos de beneficiamento. As características do minério das diversas frentes de lavra por mais que apresentem teores de ferro e contaminantes semelhantes, provavelmente não são as mesmas, e principalmente em alguns casos não podem ser detectadas por uma simples avaliação tipológica, o que pode acarretar performance distintas de recuperação mássica e metalúrgica, especificação de produtos, teores de ferro no rejeito, entre outras, para o circuito de concentração magnética em questão.

Observa-se no geral que, a alimentação da concentração magnética apresenta alto grau de liberação oriundo da própria característica natural do minério, propiciando além de uma melhor concentração dos minérios úteis de interesse, a dispensa de métodos de fragmentação e/ou cominuição e menor OPEX.

O circuito de concentração magnética avaliado, apresenta boa eficiência em termos mássicos, metalúrgicos e químicos. Entretanto, esta eficiência encontra-se condicionada a 2 fatores principais: mineralogia e granulometria da alimentação.

Observa-se claramente que a goethita terrosa não é concentrável pelo processo magnético, e a goethita botrioidal apresenta baixa concentração. Não se limitando a isto, a granulometria menor que 0,020 mm, encontra-se no limite crítico de trabalho do concentrador (WHIMS).

Estes dois fatores principais citados, ditam a eficiência da concentração magnética avaliada, considerando que as variáveis operacionais e de processo estejam adequadas.

Assim sendo, este trabalho envolvendo estudo de caracterização mineralógica, granulométrica, química e grau de liberação dos fluxos de alimentação, concentrado e rejeito, permitiu de forma clara, identificar o desempenho do circuito da concentração magnética, principais ganhos e perdas de eficiência, além de oportunidades de melhorias no processo e orientação para estudos futuros de caracterização.

7 - SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A variação da eficiência leva ao final do período produtivo, perda de receita, diminuição da vida útil da jazida, diminuição a área de disposição de estéril e rejeito, elevação de custos, entre outros.

Neste sentido, um estudo de comportamento da hematita botrioidal para a rota de processo estudada deve-se ser realizado, visto que a perda metálica do circuito de concentração magnética está intimamente ligada a esta litologia.

Além disso, um estudo de caracterização dos recursos da Mina (Jazida), deve-se ser realizado a fim de proporcionar a composição de um blend ótimo para a alimentação da concentração magnética, visto que há uma diferença clara de comportamento das diversas litologias contidas no fluxo de alimentação, nesta fase do processo.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO, B.B.N. The Upper Precambrian of South America. In: Bol. Inst. Geoc, USP, v.7, 1976. p. 45-80.

ALVES, M.F. ABC das Máquinas Elétricas. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2003. 59p.

ANDREUCCI, R. Partículas Magnéticas. São Paulo: Abende, 2007. 66p.

BOTTKE, H. Gutachten zur Geologie und den Vorräten der Eisenerzlagerstätte. Archiv Companhia Siderúrgica Mannesmann, 1975.

DANA, J.D; HURLBUT, C.S.JR. Manual de Mineralogia. 3 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1974. 641p.

DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. An introduction to ther rock-forming minerals. 2 ed. London: Longmans Scientific & Technical, 1992. 696p.

DORR, J.V.N. Esboço geológico do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais. In: DNPM-USGS. Rio de Janeiro: 1959.

GROSS, G.A. Industrial and genetic models for iron ore in Iron Formations. In: KIRKHAN, R.V. et al. Mineral deposit modeling; Geological Association of Canada, Canada: Special Paper, 1993. v. 40, p. 151-170.

GUIMARÃES, G.C. Tratamento de Minérios. Ouro Preto. Centro Federal de Educação Tecnológica, 2005.

HUNDERTMARK, A. Reflexões sobre o desenvolvimento do tratamento de minério de ferro e perspectivas sobre a tecnologia do futuro. In: Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, Ouro Preto. Anais, 1996. p. 629-654.

KLEIN, C.; DUTROW, B. Manual de Ciência dos Minerais. Porta Alegre: Bookman, 2012, 23v. 698p.

LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; ALMEIDA, S.L.M. Tratamento de minérios. 4 ed. Rio Janeiro: CETEM/MCT, 2004. 867p.

NEUMAN, R.; Schneider, C.L.; NETO, A.A. Caracterização Tecnológica de Minérios. 2 ed. Tratamento de Minérios. Rio Janeiro: 2002. 109p.

PAPINI, R.M. Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais. Belo Horizonte. Escola de Engenharia UFMG, 2014. Notas de Aula. Curso de Pós Graduação em Engenharia de Minas – DEMIN.

POVEROMO, J.J. Iron Ores. In: The Aise Steel Foundation. (Ed). Ironmaking. Pittsburgh: 1999. p. 547-642.

RODRIGUES, F.; OLIVEIRA, S. Manual de Processo Concentração Magnética. Nova Lima: VALE, 2008. 28p.

ROSIÉRE, C.A.; CHEMALE, F. JR.; GUIMARÃES, M.L.V. Um Modelo para a Evolução Microestrutural dos Minérios de Ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte 1 - Estruturas e recristalização. Geonomos, Belo Horizonte:, v.1, 1993. p.65-84.

SANTOS, J.R. Caracterização Mineral Circuito Separação Magnética de Minério de Ferro. Ouro Preto: PCM, 2015. 68p.

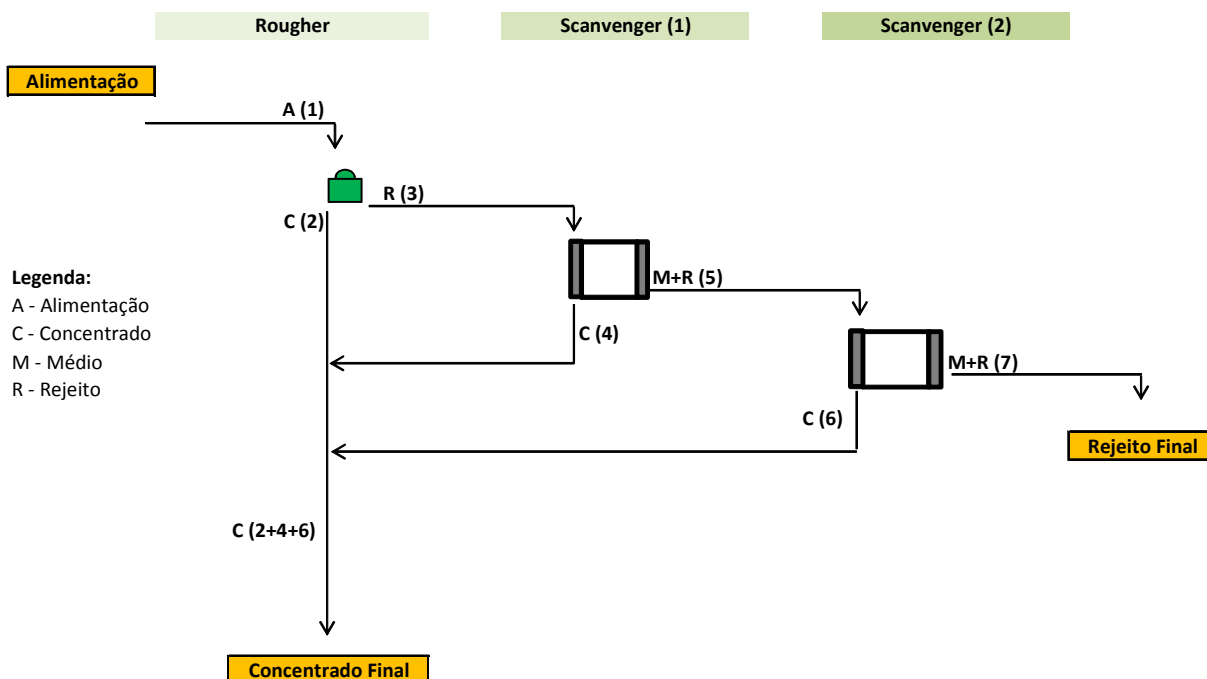
TAKEHARA, L.; JÚNIOR, F.C. Minério de Ferro; Geologia e Geometalurgia. 1 ed. São Paulo: Blucher, 2013. 202p.

VALADÃO, G.E.S. Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais. Belo Horizonte. Escola de Engenharia UFMG, 2014. Notas de Aula. Curso de Pós Graduação em Engenharia de Minas – DEMIN.

VALADÃO, G.E.S.; ARAÚJO, A.C. Introdução ao Tratamento de Minérios. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 232p.

9 - ANEXOS

9.1 - Rota de Processo da Concentração Magnética Estudada



9.2 - Análise Granulométrica Alimentação

As tabelas IX.1, IX.2 e IX.3, apresentam-se as análises granulométricas dos fluxos de alimentação, concentrado e rejeito.

Tabela IX. 1 - Análise Granulométrica Alimentação - Amostras (1, 2 e 3)

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA - PENEIRAMENTO A ÚMIDO/CILAS									
Abertura da peneira (mm)	% retida simples			% retida acum.			% passante acum.		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
0,150	3,46	3,25	2,24	3,46	3,25	2,24	96,54	96,75	97,76
0,106	4,87	4,25	3,74	8,33	7,50	5,98	91,67	92,50	94,02
0,074	11,97	13,71	11,50	20,30	21,21	17,48	79,70	78,79	82,52
0,053	19,56	20,47	18,95	39,85	41,68	36,43	60,15	58,32	63,57
0,045	16,62	14,13	16,74	56,47	55,81	53,17	43,53	44,19	46,83
0,036	10,21	8,46	9,71	66,68	64,26	62,89	33,32	35,74	37,11
0,032	8,74	7,24	8,41	75,42	71,50	71,29	24,58	28,50	28,71
0,025	5,97	5,03	5,97	81,40	76,54	77,27	18,60	23,46	22,73
0,020	4,18	3,74	4,41	85,58	80,27	81,67	14,42	19,73	18,33
0,015	2,81	2,87	3,18	88,38	83,14	84,85	11,62	16,86	15,15
0,012	2,20	2,52	2,59	90,59	85,67	87,44	9,41	14,33	12,56
0,010	1,86	2,31	2,25	92,44	87,98	89,69	7,56	12,02	10,31
0,0080	1,55	2,08	1,93	93,99	90,06	91,62	6,01	9,94	8,38
0,0060	1,24	1,82	1,63	95,23	91,89	93,24	4,77	8,11	6,76
0,0050	1,08	1,68	1,47	96,31	93,57	94,71	3,69	6,43	5,29
0,0040	0,92	1,52	1,29	97,23	95,09	96,00	2,77	4,91	4,00
0,0032	0,78	1,34	1,11	98,01	96,44	97,11	1,99	3,56	2,89
0,0026	0,66	1,16	0,95	98,67	97,60	98,06	1,33	2,40	1,94
0,0020	0,52	0,94	0,76	99,19	98,54	98,83	0,81	1,46	1,17
0,0014	0,41	0,75	0,60	99,60	99,30	99,43	0,40	0,70	0,57
0,0010	0,40	0,70	0,57	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00

9.3 - Análise Granulométrica Concentrado

Tabela IX. 2 - Análise Granulométrica Concentrado - Amostras (1, 2 e 3)

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA - PENEIRAMENTO A ÚMIDO/CILAS									
Abertura da peneira (mm)	% retida simples			% retida acum.			% passante acum.		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
0,150	2,21	2,51	1,84	2,21	2,51	1,84	97,79	97,49	98,16
0,106	5,18	5,89	4,72	7,39	8,39	6,56	92,61	91,61	93,44
0,074	17,54	19,60	15,67	24,93	27,99	22,24	75,07	72,01	77,76
0,053	27,44	28,22	25,08	52,37	56,21	47,32	47,63	43,79	52,68
0,045	17,77	18,31	20,98	70,14	74,52	68,30	29,86	25,48	31,70
0,036	9,76	9,70	11,30	79,90	84,22	79,61	20,10	15,78	20,39
0,032	7,63	7,14	8,64	87,52	91,36	88,25	12,48	8,64	11,75
0,025	3,96	3,00	4,16	91,48	94,36	92,41	8,52	5,64	7,59
0,020	2,07	1,19	1,97	93,55	95,54	94,38	6,45	4,46	5,62
0,015	1,14	0,63	1,00	94,69	96,17	95,38	5,31	3,83	4,62
0,012	0,91	0,63	0,81	95,60	96,80	96,19	4,40	3,20	3,81
0,010	0,80	0,59	0,70	96,40	97,39	96,89	3,60	2,61	3,11
0,0080	0,67	0,46	0,56	97,07	97,85	97,46	2,93	2,15	2,54
0,0060	0,53	0,33	0,42	97,60	98,19	97,88	2,40	1,81	2,12
0,0050	0,48	0,31	0,38	98,08	98,49	98,26	1,92	1,51	1,74
0,0040	0,44	0,31	0,36	98,52	98,80	98,62	1,48	1,20	1,38
0,0032	0,40	0,30	0,34	98,91	99,10	98,96	1,09	0,90	1,04
0,0026	0,34	0,27	0,30	99,26	99,36	99,26	0,74	0,64	0,74
0,0020	0,28	0,22	0,26	99,54	99,59	99,52	0,46	0,41	0,48
0,0014	0,23	0,21	0,24	99,77	99,79	99,76	0,23	0,21	0,24
0,0010	0,23	0,21	0,24	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00

9.4 - Análise Granulométrica Rejeito

Tabela IX. 3 - Análise Granulométrica Rejeito - Amostras (1, 2 e 3)

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA - PENEIRAMENTO A ÚMIDO/CILAS									
Abertura da peneira (mm)	% retida simples			% retida acum.			% passante acum.		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
0,150	6,72	7,54	3,53	6,72	7,54	3,53	93,28	92,46	96,47
0,106	6,91	6,89	4,95	13,63	14,42	8,49	86,37	85,58	91,51
0,074	16,13	15,07	10,23	29,75	29,49	18,71	70,25	70,51	81,29
0,053	18,35	19,65	16,06	48,10	49,14	34,77	51,90	50,86	65,23
0,045	11,13	11,66	13,18	59,24	60,80	47,95	40,76	39,20	52,05
0,036	6,69	6,62	7,25	65,93	67,42	55,20	34,07	32,58	44,80
0,032	5,84	5,62	6,59	71,77	73,04	61,80	28,23	26,96	38,20
0,025	4,37	3,97	5,38	76,15	77,01	67,18	23,85	22,99	32,82
0,020	3,53	3,13	4,61	79,67	80,13	71,79	20,33	19,87	28,21
0,015	2,93	2,66	3,99	82,60	82,79	75,78	17,40	17,21	24,22
0,012	2,65	2,46	3,63	85,25	85,25	79,40	14,75	14,75	20,60
0,010	2,45	2,31	3,36	87,70	87,56	82,77	12,30	12,44	17,23
0,0080	2,22	2,12	3,06	89,92	89,68	85,83	10,08	10,32	14,17
0,0060	1,94	1,87	2,70	91,86	91,55	88,52	8,14	8,45	11,48
0,0050	1,78	1,74	2,47	93,64	93,29	91,00	6,36	6,71	9,00
0,0040	1,58	1,58	2,20	95,21	94,88	93,20	4,79	5,12	6,80
0,0032	1,37	1,41	1,91	96,58	96,29	95,10	3,42	3,71	4,90
0,0026	1,16	1,23	1,63	97,74	97,51	96,73	2,26	2,49	3,27
0,0020	0,92	1,00	1,30	98,65	98,51	98,04	1,35	1,49	1,96
0,0014	0,70	0,78	1,02	99,36	99,29	99,06	0,64	0,71	0,94
0,0010	0,64	0,71	0,94	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00