

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

Dissertação de Mestrado

Caracterização de rejeito da barragem da mina de ferro de Gongo Soco, MG, com foco  
na definição de rota de processo para recuperação de barragens

Autor: Lys Daniele da Costa Tavares  
Orientador: Paulo Roberto Gomes Brandão  
Fevereiro/2018

Lys Daniele da Costa Tavares

Caracterização de rejeito da barragem da mina de ferro de Gongo Soco, MG, com foco na definição de rota de processo para recuperação de barragens

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral –  
Caracterização de Minérios

Orientador: Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão.

Belo Horizonte  
Universidade Federal de Minas Gerais  
Escola de Engenharia  
2018

T231c Tavares, Lys Daniele da Costa.  
Caracterização de rejeito da barragem da mina de ferro de Gongo Soco, MG, com foco na definição de rota de processo para recuperação de barragens [recurso eletrônico] / Lys Daniele da Costa Tavares. – 2018. 1 recurso online (93 f.: il., color.): pdf.

Orientador: Paulo Roberto Gomes Brandão.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 91-93.  
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses. 3. Rejeito - Teses. 4. Determinação mineralógica - Teses. I. Brandão, Paulo Roberto Gomes. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622(043)



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



Dissertação intitulada "**Caracterização de Rejeito da Barragem da Mina de Ferro de Gongo Soco, MG, com Foco na Definição de Rota de Processo para Recuperação de Barragens**", área de concentração: Tecnologia Mineral, apresentada pela candidata **Lys Daniele da Costa Tavares**, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, aprovada pela comissão examinadora constituída pelos seguintes membros:

Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão  
Orientador - Ph.D. (UFMG)

Prof. Carlos Esteves Teixeira Júnior  
Dr. (UFMG)

Ernandes Sávio de Souza  
Dr. (VALE)

Marcos Gomes Vieira  
Dr. (SAMARCO)

Prof. Rodrigo Lambert Oréfice  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Metalúrgica, Materiais e de Minas/UFMG

Belo Horizonte, 26 de fevereiro de 2018

## **AGRADECIMENTOS**

A autora agradece a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho e, em particular:

A empresa VALE S.A., pela disponibilidade e colaboração para realização deste trabalho;

Ao professor, orientador e amigo Paulo Roberto Gomes Brandão por sua compreensão, disponibilidade e orientação ao longo do curso;

Ao Ernandes Sávio e André Carmo, pelo incentivo e oportunidade dada para conclusão desse projeto;

Aos Engenheiros Nilson Paula e Tatiane Rocha, pela cooperação durante os ensaios de laboratório e, sobretudo por ter proporcionado condições para a conclusão deste trabalho;

Ao técnico Karlay Guimarães pela disponibilidade, dedicação e capricho com as amostras;

Aos meus pais, Honorato e Rosemary Tavares; irmãos, Felipe e Larissa Tavares e meu esposo, Murilo Lima, pelo estímulo ao longo do trabalho.

## RESUMO

Durante um processo de beneficiamento de minério por concentração mineral, parte da massa processada torna-se produto (concentrado) e outra parte, torna-se dispensável (rejeito), sendo então depositada em barragens. Contudo, com aumento da produção nas empresas, a geração de rejeito tende a ser cada vez maior e se não for devidamente gerida, poderá gerar passivos ambientais.

Tendo em vista esse cenário, foi proposto um estudo com o rejeito de barragem da Mina de Gongo Soco, com o objetivo de definir uma rota de processo para o beneficiamento deste rejeito de minério de ferro, a partir da caracterização granulométrica-químico-mineralógica-microestrutural das amostras da barragem e realização de testes de concentração e separação sólido-líquido, em bancada.

Para a caracterização mineral, foram realizados ensaios de granuloquímica, microscopia ótica, difratometria de raios-X e, análise via QEMSCAN (microscópio eletrônico de varredura com microanálise EDS, automático), a fim de verificar a composição mineralógica das amostras. Assim, foi observada forte presença de hematita compacta e um grau de liberação favorável a processos de concentração magnética.

Os resultados dos testes de bancada corroboraram essa aplicação, uma vez que apresentaram dados satisfatórios tanto na qualidade (química e física) como na massa de produto gerada. Então, o produto oriundo desse rejeito seria um fino comum, com 62,65% Fe e 7,00% SiO<sub>2</sub> e umidade máxima de 10,70%, com recuperação mássica de 75% e recuperação metalúrgica de 87,05%, constituindo assim um protoproduto. Este teria grande relevância, pois poderia ser usado em blendagem com demais produtos, maximizando o aproveitamento de recursos. Dessa forma, pode-se afirmar que esse rejeito pode ser aproveitado a partir da rota de processo proposta.

**Palavra – Chave:** Rejeito; Caracterização Mineral; Rota de Processo.

## ABSTRACT

During a process of ore processing by mineral concentration, part of the processed mass becomes product (concentrate) and another part becomes waste, which is then deposited in dams. However, with increased production in companies, waste generation tends to increase and if not properly managed, it may generate environmental liabilities. Considering this scenario, a study with the tailings dam of the Gongo Soco Mine was proposed, with the objective of defining a process route for the treatment of this iron ore tailings, based on the chemical-mineralogical-microstructural characterization of the dam samples and bench tests of solid-liquid separation and concentration.

For the mineral characterization, granulometric, optical microscopy, X-ray diffractometry and even QEMSCAN (automatic scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray microanalysis) tests were carried out to verify the mineralogical composition of the samples. A strong presence of compact hematite was observed along with a high liberation degree, favorable to processing by magnetic concentration.

The results of the bench tests agreed with this application, since both the quality (chemical and physical) and the mass of the product generated were satisfactory. Therefore, the product from the treated waste would be a fine sinter feed, with 62.65% Fe, 7.00% SiO<sub>2</sub> and maximum humidity at 10.70%, having 75.0% mass recovery and 87.05% metallurgical recovery, being considered a protoproduct. This concentrate has great relevance because it could be used in blending with other products, thus maximizing the use of resources. As a conclusion, this waste can be utilized following the proposed process route.

Keywords: Waste; Mineral Characterization; Process Route.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3. 1 O papel central da mineralogia nas Ciências da Terra. (KLEIN e DUTROW, 2012). .....	17
Figura 3.2 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida - nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Partículas contendo cristais de hematita compacta. (CPT – Centro de Pesquisas Tecnológicas VALE, 2013). .....	19
Figura 3. 3 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida - nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Partículas contendo cristais de hematita especular. (CPT – Centro de Pesquisas Tecnológicas VALE, 2013). .....	19
Figura 3.4 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida - nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Partículas contendo cristais de hematita granular. (CPT – Centro de Pesquisas Tecnológicas VALE, 2013). .....	20
Figura 3.5 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida - nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Partículas contendo cristais de hematita martítica. (CPT – Centro de Pesquisas Tecnológicas VALE, 2013). .....	20
Figura 3.6 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida – nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Cristais de magnetita. (CPT – Centro de Pesquisas Tecnológicas VALE, 2013). .....	21
Figura 3. 7 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida – nicóis cruzados. Tipos morfológicos de goethita compacta. (CPT – Centro de Pesquisas Tecnológicas VALE, 2013). .....	22
Figura 3.8 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida. Cristais de quartzo. (CPT – Centro de Pesquisas Tecnológicas VALE, 2013). .....	23
Figura 3.9 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida – nicóis cruzados. Partícula de caulinita (CPT – VALE, 2013). .....	24
Figura 3.10 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida – nicóis paralelos (esquerda) e cruzados (direita). Partículas contendo gibbsita. (CPT – Centro de Pesquisas Tecnológicas VALE, 2013) .....	25
Figura 3.11 Representação esquemática das possíveis transições eletrônicas e suas denominações (PANDOLFO, 2006). .....	28
Figura 3.12 Seção transversal esquemática de um microscópio de luz refletida, mostrando a trajetória da luz e alguns dos componentes do microscópio. (KLEIN e DUTROW (2012). .....	30



Figura 3.13 Da esquerda para a direita: câmara de pó ou de Debye-Scherrer (Kahn, 2001); difratômetro de raios-X, marca PANalytical, modelo X'Pert PRO (Fernandes, 2012). .....	31
Figura 3.14 Difratoograma de uma argila (BRANDÃO, 2015). .....	32
Figura 3.15 Fluxograma dos conjuntos dos softwares que compõem o iDiscover do QEMSCAN (GONÇALVES, 2012).....	33
Figura 3.16 Representação esquemática de um classificador (CORREIA, 2010) .....	35
Figura 3.17 Representação esquemática de hidrociclone (Napier-Munn et al.,2006)..	37
Figura 3.18 Regiões de distribuição de tamanho semelhante dentro de ciclone (Napier-Munn et al.,2006). .....	38
Figura 3.20 Curva de partição típica de hidrociclone. (Napier-Munn et al.,2006).....	40
Figura 3.21 Representação das matrizes (VALE, 2014). .....	44
Figura 3.22 Ilustração dos pacotes magnéticos localizados na circunferência de dois rotores (de Paula, 2014). .....	45
Figura 3.23 Desenho esquemático de concentrador magnético (VALE, 2014). .....	46
Figura 3.24 Fluxo de espessador contínuo (WILLS e NAPIER MUNN, 2006).....	50
Figura 3.25 Fases da etapa de sedimentação em um espessador. (VALE, 2014). .....	51
Figura 3.26 Fases de um ensaio de sedimentação e a respectiva curva. (VALE, 2014). .....	52
Figura 3.27 Esquemática de filtragem com formação de torta. (FRANÇA, 2010). .	53
Figura 3. 28 Operação do filtro rotativo a vácuo. (FRANÇA, 2010).....	54
Figura 3.29 Fluxograma ITMI – Mina de Gongo Soco. (VALE, 2008). .....	57
Figura 3.30 Fluxograma ITMIII – Mina de Gongo Soco. (VALE, 2008).....	60
Figura 3.31 Foto aérea da barragem Sul Superior, Mina Gongo Soco. (VALE, 2008).	61
Figura 4.1 Fluxograma resumido do método da pesquisa. (Próprio Autor, 2016) .....	62
Figura 4.2 Áreas de coleta das amostras de barragem. (VALE, 2016).....	63
Figura 4.3 Fluxograma simplificado para caracterização das amostras (VALE, 2014).	65
Figura 4.4 Concentrador eletromagnético Micromag. (VALE, 2014). .....	69

Figura 4.5 Da esquerda para a direita: Aparato para ensaios de leaf test; Montagem para realização dos ensaios top feed. (VALE, 2014).	69
Figura 5.1 - Quantificação mineralógica grupo de amostras G1 (CPT – VALE, 2017).	74
Figura 5.2 - Formas de Ocorrência da Hematita – Amostras G1 (CPT – VALE, 2017).	75
Figura 5.3 - Forma de ocorrência da goethita – Amostras G1 (CPT – VALE, 2017).	76
Figura 5.4 Formas de ocorrência de quartzo e contaminantes– Amostras G1 (CPT – VALE, 2017).	77
Figura 5.5 Quantificação mineralógica grupo de amostras G2 (CPT – VALE, 2016).	78
Figura 5.6 Formas de ocorrência de hematita – Amostras G2 (CPT – VALE, 2016).	79
Figura 5. 7 Formas de ocorrência de goethita – Amostras G2 (CPT – VALE, 2016).	80
Figura 5.8 Formas de ocorrência de quartzo e contaminantes– Amostras G2 (CPT – VALE, 2016).	81
Figura 5.9. Gráfico comparativo dos difratogramas gerados das amostras G1 (CPT – VALE, 2017).	83
Figura 5.10 Grau de liberação do quartzo, grupo de amostras G1 (CPT – VALE, 2017).	86
Figura 5.11 Imagem digital obtida no QEMSCAN, amostra AM1-G1 (CPT – VALE, 2017).	87
Figura 5.12 Imagem digital obtida no QEMSCAN, amostra AM2-G1 (CPT – VALE, 2017).	88
Figura 5.13 Imagem digital obtida no QEMSCAN, amostra AM3-G1 (CPT – VALE, 2017).	89
Figura 5.14 Imagem digital obtida no QEMSCAN, amostra AM4-G1 (CPT – VALE, 2017).	90
Figura 5.15 Imagens de elétrons retroespalhados no QEMSCAN, amostras G1 (CPT – VALE, 2017).	91
Figura 5.17 Rota de processo e BM Detalhado (Próprio Autor – 2017).	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela III. 1 Técnicas de mineralogia de uso mais difundido na caracterização de minérios (Sant' Agostino e Kahn, 1997) .....	27
Tabela III. 2 Métodos de concentração baseado na propriedade diferenciadora dos minerais (modificado de Araújo et al., 2008) .....	41
Tabela V.1 - Química natural – Amostras grupo G1 (CPT VALE, 2017).....	73
Tabela V.2 - Granuloquímica natural – Amostras grupo G2 (CPT VALE, 2017).....	73
Tabela V.3 - Quantificação mineralógica grupo de amostras G1 (CPT – VALE, 2017). .....	74
Tabela V.4 -Quantificação mineralógica grupo de amostras G2 (CPT – VALE, 2016).	77
Tabela V.5 - Estimativa da composição modal das amostras G1. (CPT – VALE, 2017). .....	82
Tabela V.6 -Quantificação mineralógica das amostras G1, via QEMSCAN. (CPT – VALE, 2017).....	85
Tabela V.7 - Resultados dos testes de concentração magnética – Amostras G2 (CPT – VALE, 2017).....	93
Tabela V.8 - Resultados dos testes exploratórios de filtragem: definição do elemento filtrante (CPT – VALE, 2017) .....	94
Tabela V.9 - Resultados teste de filtragem (Leaf Test) – Concentrado magnético (CPT – VALE, 2017).....	95
Tabela V.10 - Resultados teste de sedimentação – fração -0,075mm do rejeito da concentração magnética (CPT – VALE, 2017) .....	96
Tabela V.11 - Granuloquímica da amostra média da barragem Gongo Soco (CPT – VALE, 2016).....	98
Tabela V.12 -Principais dados do balanço de massa – circuito concentração magnética (Próprio autor, 2017) .....	98

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
3.1. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICO-MINERALÓGICA-MICROESTRUTURAL.....	17
3.1.1. <i>Mineralogia do Minério de Ferro - Descrição dos principais óxidos e oxi-hidróxidos de ferro</i> .....	18
3.1.1.1. Hematita .....	18
3.1.1.3. Goethita .....	22
3.1.2 <i>Mineralogia do Minério de Ferro - Descrição dos principais minerais de ganga constituintes do minério de ferro</i> .....	23
3.1.2.1. Quartzo .....	23
3.1.2.2. Caulinita.....	24
3.1.2.3. Gibbsita .....	24
3.1.3 <i>Técnicas de Mineralogia Aplicadas a Caracterização Mineral</i> .....	25
3.1.3.1. Espectrometria de Fluorescência de Raios-X.....	27
3.1.3.2. Microscopia Óptica.....	29
3.1.3.3. Difratomia de Raios-X .....	30
3.1.3.4. QEMSCAN .....	32
3.2. TÓPICO DE ROTAS DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIOS – PARTÍCULAS <1MM .....	34
3.2.1. <i>Classificação</i> .....	34
3.2.1.1. Hidrociclonagem.....	36
3.2.2. <i>Concentração</i> .....	40
3.2.2.1. Concentração Magnética .....	43
3.2.3. <i>Separação Sólido-Líquido</i> .....	48
3.2.3.1. Espessamento .....	49
3.2.3.2. Filtragem.....	52
3.3. MINA DE GONGO SOCO.....	55
3.3.1. <i>Instalação de Beneficiamento</i> .....	55
3.3.2. <i>Barragem de Rejeito – Barragem Sul Superior</i> .....	61
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>62</b>
4.1. AMOSTRAGEM.....	62
4.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA-GRANULOMÉTRICA-MINERALÓGICA-MICROESTRUTURAL.....	63
4.2.1. <i>Análise Granulométrica</i> .....	66
4.2.2 <i>Análise Química</i> .....	66
4.2.3 <i>Análise por Microscopia de Luz Refletida</i> .....	67
4.2.4 <i>Análise por Difratomia de Raios-X</i> .....	67
4.2.5 <i>Análise por QEMSCAN</i> .....	67
4.3. TESTES DE PROCESSO .....	68
4.3.1 <i>Teste em Bancada – Concentração Magnética</i> .....	68

4.3.2 Teste em Bancada – Filtragem (Leaf Test).....	69
4.3.3 Teste em Bancada – Sedimentação .....	70
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>71</b>
5.1. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICO-MINERALÓGICA-MICROESTRUTURAL.....	71
5.1.1 Análise Química.....	72
5.1.2 Análise por Microscopia Luz Refletida .....	74
5.1.3 Análise por Difratomia de Raios-X.....	82
5.1.4 Análise por QEMSCAN .....	84
5.2. TESTES EM BANCADA .....	92
5.2.1 Teste em Bancada – Concentração Magnética.....	92
5.2.2. Teste em Bancada – Filtragem (Leaf Test).....	94
5.2.3 Teste em Bancada - Sedimentação .....	95
5.2.4 Rota de Processo.....	97
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>100</b>
<b>7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>102</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>103</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em 2015, as substâncias da classe dos metálicos responderam por cerca de 76% do valor total da produção mineral comercializada brasileira. Dentre essas substâncias, oito destacam-se por corresponderem a 98,5% do valor da produção comercializada da classe, quais sejam: alumínio, cobre, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel e ouro. O valor da produção comercializada dessas oito substâncias totalizou 6,5 bilhões de reais, com destaque para a expressiva participação do ferro nesse montante, cuja produção é concentrada, principalmente, nos estados de Minas Gerais e Pará. (PINHEIRO *et al.*, 2016).

O processo de beneficiamento de minério de ferro na fração mais grossa constitui-se basicamente de britagem e classificação, gerando dois produtos básicos, tais como o granulado e o *sínter feed*, com baixos teores de sílica. Os finos oriundos da etapa de classificação apresentam teores elevados de sílica, cuja redução é possível através do processo de concentração, seja separação magnética e/ou flotação.

Tendo em vista o cenário atual, em que a indústria de mineração no Brasil passa por momentos extremamente complicados em consequência da redução dos preços da sua principal “commodity” (minério de ferro), bem como a redução de demanda do mesmo, é sabido da crescente necessidade das empresas do setor em reduzirem seus custos operacionais e maximizarem seus recursos.

Assim, para que um mineral possa ser aproveitado de forma otimizada, ao longo das operações unitárias de tratamento de minérios, é necessária a realização de uma etapa fundamental, a caracterização do minério. Essa etapa é crucial, uma vez que possibilita o dimensionamento da rota de processo e, ainda, permite identificar, com precisão, ineficiências e perdas em processos existentes, possibilitando a otimização do rendimento global de uma planta (NEUMANN *et al.*; 2004).

Como a maioria das reservas nacionais de minério de ferro apresentam teores elevados de sílica, faz-se necessária instalação de usina de concentração. Com isso, nas usinas em que ocorre processo de concentração, além do concentrado, nome dado ao produto final oriundo do processo de beneficiamento, ocorre a geração de rejeitos

oriundos dos diversos fluxos das operações unitárias, provocando passivos ambientais que posteriormente deverão ser tratados.

A fim de solucionar esses problemas, as empresas de mineração estão cada vez mais se empenhando em avançar as suas técnicas de recuperação e beneficiamento de rejeitos. Principalmente, porque em alguns casos, o percentual de ferro encontrado no rejeito depositado nas barragens encontra-se maior que o teor de corte das minas atualmente explotadas. Isso se deve ao fato de que, no início da exploração mineral, a reserva encontrava-se com teor mais elevado, litologicamente representada por hematita, e com passar do tempo, deu lugar a litologias de menor teor, tais como itabirito, jaspelito, entre outros.

Além do mais, sabe-se da atual dificuldade de liberação de novas licenças ambientais para deposição de rejeito. Dessa forma, um estudo visando a recuperação e beneficiamento de rejeitos, contribui também para deposição de rejeito em áreas já existentes, após o esvaziamento parcial dos volumes previamente ocupados.

Tendo em vista esse cenário, justifica-se a realização de um estudo a fim de definir uma rota de beneficiamento para aproveitamento dos rejeitos depositados na Barragem Sul Superior, da Mina de Gongo Soco, localizada no município de Barão de Cocais, na região central de Minas Gerais.

A Mina de Gongo Soco começou a operar em 1994, quando entrou em operação a Instalação de Tratamento de Minério I (ITM I), período esse que o ROM alimentado era somente de hematita. Em 1997 foi verificada necessidade de instalar o circuito de concentração de itabiritos, o qual contemplava um circuito de jigagem (fração -8 +1mm) e um circuito de espirais concentradoras (fração -1 +0,15mm), dessa forma, a fração - 0,15mm era toda rejeitada, uma vez que seu teor era menor que 30% de ferro. A partir dessa nova configuração, a instalação de beneficiamento passou a operar 90% do tempo com hematita e 10% com itabirito, o que possibilitou ao longo dos anos, uma massa de rejeito próxima a 10Mt, com teor médio de ferro de 54%.

Assim sendo, esse trabalho visa a caracterização mineralógica do rejeito de minério de ferro depositado na Barragem Sul Superior e, a partir dos dados obtidos, definir uma rota de processo para o beneficiamento desse rejeito, contribuindo não

somente para o máximo aproveitamento dos recursos minerais, mas principalmente, para a minimização de passivo ambiental, uma vez que aproveitaria estruturas existentes para deposição do rejeito final.



## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral desse projeto é definir uma rota de processo para o beneficiamento do rejeito de minério de ferro, proveniente da usina de Gongo Soco, contribuindo para a minimização de passível ambiental.

A fim de alcançar o objetivo geral, faz-se necessário o atingimento dos objetivos específicos, tais como caracterização química-granulométrica-mineralógica-microestrutural das amostras da barragem em estudo e realização de testes de concentração, espessamento e filtração.

A partir desta caracterização, espera-se ter o conhecimento necessário das propriedades principais das amostras coletadas, as quais devem ser representativas, a fim de obter os resultados esperados, tais como:

- Maioria das partículas com granulometria menor que 1 mm: possibilitando produção de *sínter feed fino, via concentração magnética*;
- Elevado teor de ferro e elevada liberação dos minerais.

A partir de testes de concentração, espessamento e filtração ratificar os resultados esperados a partir da caracterização e definir parâmetros adequados ao processo.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica apresentará de forma sucinta a teoria aplicada na caracterização de minerais e a aplicação da mesma na identificação/definição das rotas de processamento mineral, conduzindo assim aos principais métodos que são aplicados na interpretação dos resultados nesse trabalho.

#### 3.1. Caracterização químico-mineralógica-microestrutural

A mineralogia é a ciência voltada para o estudo dos minerais, os quais são definidos como sólidos de ocorrência natural com um arranjo atômico altamente ordenado e uma composição química homogênea e definida, mas não necessariamente fixa (KLEIN e DUTROW, 2012).

Com vasta aplicação, a mineralogia contribui para estudos em diversos campos, conforme evidenciado na Figura 3.1. Tendo em vista a necessidade de avaliar a viabilidade de exploração de depósitos minerais e rotas de beneficiamento adequadas para o tratamento desses minerais, o campo de Geologia Econômica está intimamente ligado.

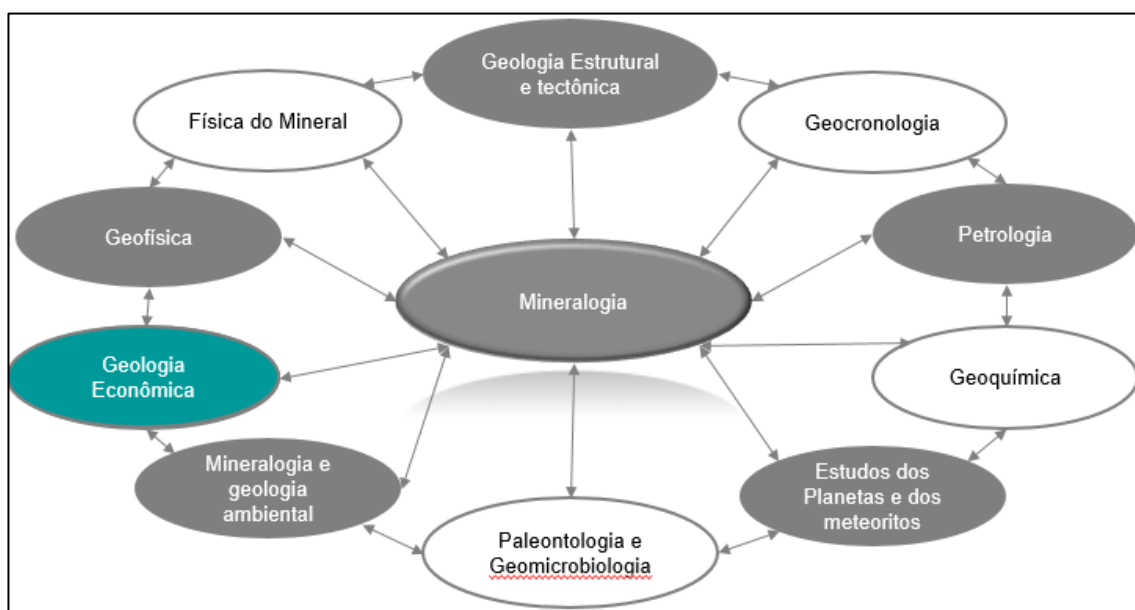


Figura 3. 1 O papel central da mineralogia nas Ciências da Terra. (KLEIN e DUTROW, 2012).

### 3.1.1. Mineralogia do Minério de Ferro - Descrição dos principais óxidos e oxi-hidróxidos de ferro

Os minerais portadores de ferro pertencem a classe dos óxidos e oxi-hidróxidos, uma vez que apresentam ligadas à sua estrutura, átomos de oxigênio e hidrogênio, sendo que a diferença de um mineral para outro é basicamente a valência do ferro e a estrutura cristalina. Além dos minerais portadores de ferro, há também aqueles que possuem baixo valor agregado, denominado como ganga.

No grupo dos óxidos, pode-se destacar a hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ); no grupo dos oxi-hidróxidos, destacam-se a: goethita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ), akaganeíta ( $\beta\text{-FeOOH}$ ), lepidocrocita ( $\gamma\text{-FeOOH}$ ), ferroxihita ( $\delta\text{-FeOOH}$ ) e ferrihidrita ( $\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), sendo a goethita o único oxi-hidróxido encontrado nos minérios brasileiros.

Dentre os principais minerais portadores de ferro encontrados nos depósitos minerais, pode-se citar a **hematita** ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), **magnetita** ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), **goethita** ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ).

#### 3.1.1.1. Hematita

A hematita é o mais importante mineral de ferro, sendo definida por  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , fazendo parte do grupo dos óxidos de ferro. Pode ser encontrada em rochas de diversas idades, podendo ser encontrada desde escalas microscópicas até enormes massas em rochas, como é o caso da Mina de Carajás. Com relação à composição química, é considerada enriquecida a partir de 50% de ferro e como pura, com 69,94% de ferro (30,06% de oxigênio).

De acordo com KLEIN e DUTROW (2012), a hematita apresenta sistema cristalino hexagonal-R, geralmente encontrada na forma tabular, espessa a fina, podendo também ser encontrada nas formas laminada, especular, micácea ou ainda oolítica (pequenas esferas). Por apresentar diferentes formas, recebe diferentes alcunhas, tais como hematita compacta, hematita especular, hematita granular e ainda martita (neste caso, a hematita se apresenta na forma de pseudomorfos octaédricos segundo a magnetita).

A hematita compacta, também chamada hematita recristalizada, apresenta cristais compactos de aspecto granular, inequidimensionais e irregulares (forma amebóide). Para distinção dos cristais ao microscópio óptico é necessária aplicação de nicóis cruzados, conforme a Figura 3.2.

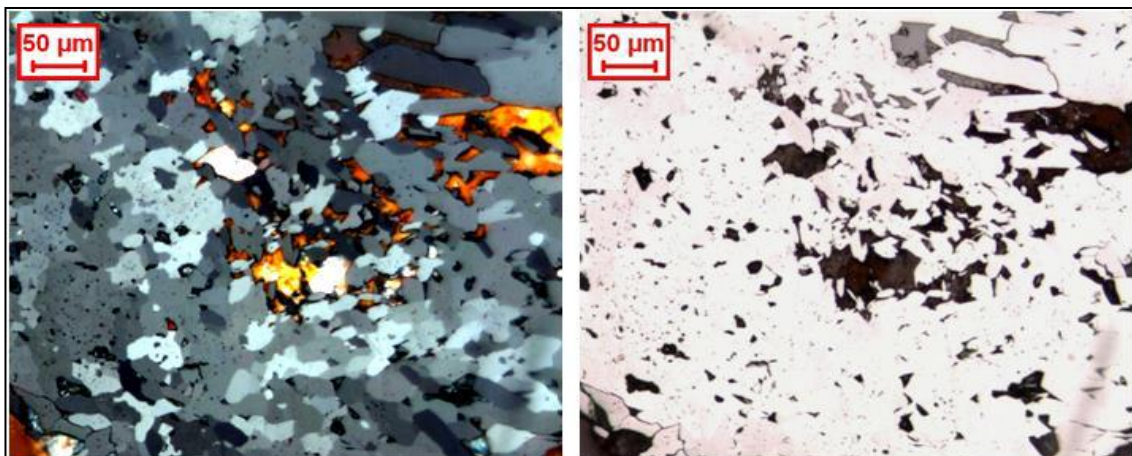


Figura 3.2 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida - nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Partículas contendo cristais de hematita compacta. (CPT – Centro de Pesquisas Tecnológicas VALE, 2013).

No que diz respeito a hematita especular, a mesma é típica de minérios com alto grau de metamorfismo, uma vez que seus cristais são compactos (pouco porosos), lateralmente retilíneos, com a relação entre comprimento e largura maior que 5:1 (cristais inequidimensionais), conforme a Figura 3.3.

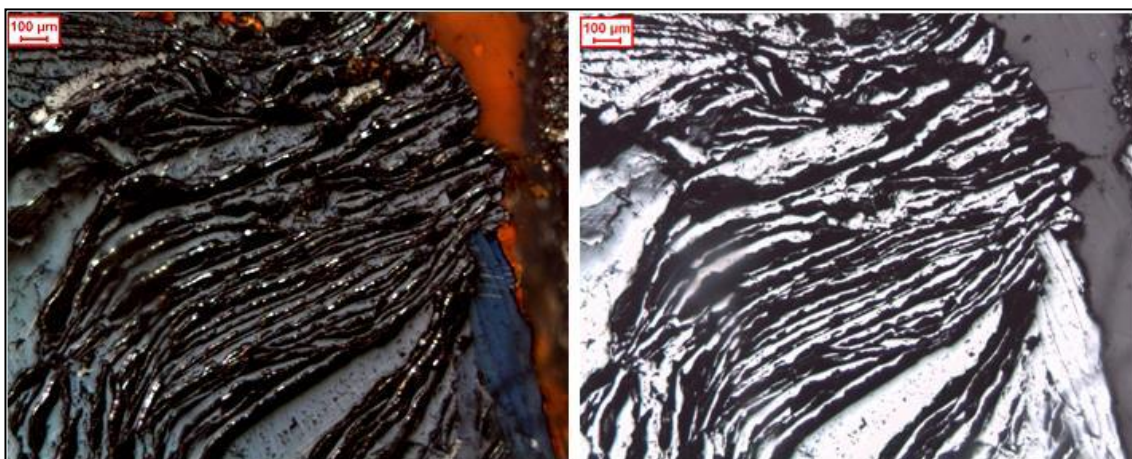


Figura 3.3 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida - nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Partículas contendo cristais de hematita especular. (CPT – Centro de Pesquisas Tecnológicas VALE, 2013).

A hematita granular apresenta cristais de aspecto granular, equidimensionais e geralmente compactos. Vale ressaltar que nas partículas policristalinas, os diversos

cristais de hematita granular apresentam contatos retilíneos e junções tríplexes entre si. Da mesma forma que a hematita compacta, para distinção dos cristais ao microscópio óptico é necessária aplicação de nicóis cruzados, conforme a Figura 3.4.

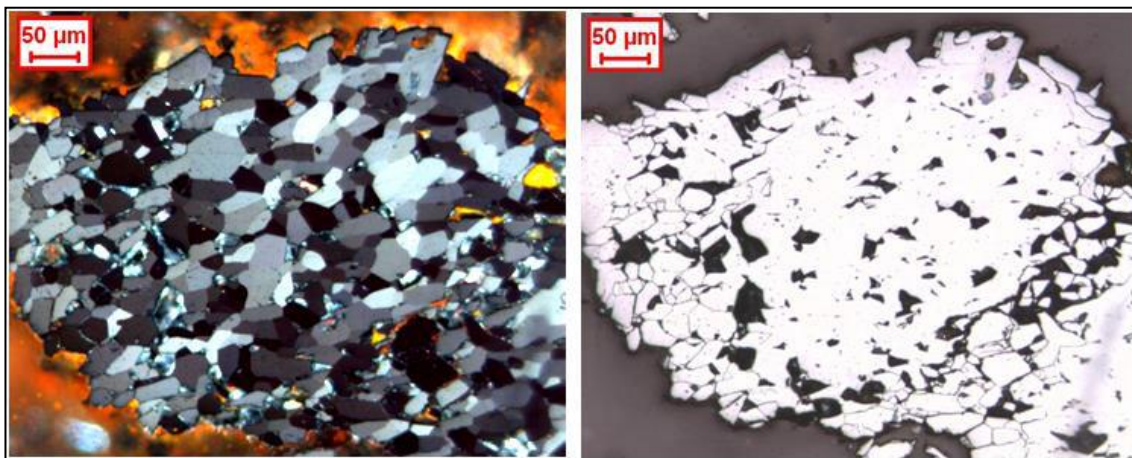


Figura 3.4 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida - nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Partículas contendo cristais de hematita granular. (CPT – Centro de Pesquisas Tecnológicas VALE, 2013).

Quanto a hematita martítica, a mesma é formada pela oxidação da magnetita segundo os planos cristalográficos da mesma, apresentando microporosidade característica e geralmente preservando relictos de magnetita. Pode apresentar estrutura em treliça, que são vestígios dos planos de cristalização da magnetita, observada com nicóis cruzados, conforme Figura 3.5.



Figura 3.5 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida - nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Partículas contendo cristais de hematita martítica. (CPT – Centro de Pesquisas Tecnológicas VALE, 2013).

### 3.1.1.2. Magnetita

A magnetita é uma espinela e é componente essencial de muitas formações ferríferas. Em termos químicos, é usualmente considerada como  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  puro com 72,4% de ferro e 27,6% de oxigênio, sendo o mineral de ferro com maior teor deste elemento contido em sua forma cristalina pura.

No entanto, as magnetitas naturais, em virtude da flexibilidade da estrutura atômica da espinela, contêm, usualmente, quantidades menores de elementos como o Mg, Mn, Zn, Al, Ti e outros, na sua estrutura. Vale ressaltar que uma das propriedades que a distingue da hematita é sua forte susceptibilidade magnética, o que a faz comportar-se como um ímã natural, sendo assim facilmente identificada em campo.

Com relação a morfologia, é frequentemente encontrada em cristais de formato octaédrico e tende a apresentar granulação média, sendo consideravelmente mais grossa que os demais minerais com que coexiste, tais como quartzo e a hematita. No que diz respeito ao seu comportamento frente à luz refletida, apresenta-se com baixa refletividade, apresentando cor cinza, tendendo levemente ao marrom claro. Essas características podem ser observadas na Figura 3.6.

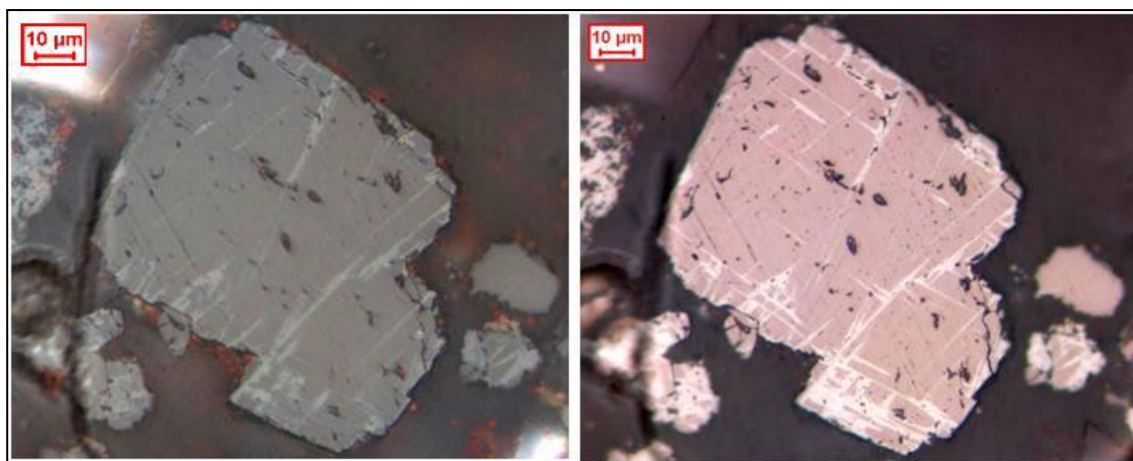


Figura 3.6 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida – nicóis cruzados (esquerda) e paralelos (direita). Cristais de magnetita. (CPT – Centro de Pesquisas Tecnológicas VALE, 2013).

### 3.1.1.3. Goethita

Conforme DEER *et al.* (1977), a goethita é um mineral que ocorre comumente como um produto de intemperismo de minerais de ferro, tais como a siderita, magnetita, pirita e outros. Ela acumula-se como um precipitado direto, tanto de águas meteóricas, como marinhas.

A goethita é um oxi-hidróxido de ferro, sendo definido por  $\alpha\text{-FeO (OH)}$ , com 62,90% ferro, 27,00% de oxigênio, 10,1% de água (as vezes, é possível encontrar quantidade consideráveis de manganês, cerca de 5%).

Quanto ao seu sistema cristalino, apresenta-se como ortorrômbico (bipiramidal), ocorrendo raramente em cristais prismáticos distintos e estriados verticalmente. Em relação aos hábitos característicos, os cristais apresentam-se nas formas acicular, maciço, reniforme e estalactítico, em agregados fibrosos radiais.

ROCHA (1997) afirma que esse mineral, com relação ao seu comportamento frente à luz refletida, apresenta cor e os valores da refletividade variando bastante, dependendo do polimento, porosidade, tamanho de grão (por exemplo, no caso de grãos mais finos, a refletividade é mais baixa). Essas características podem ser observadas na Figura 3.7.

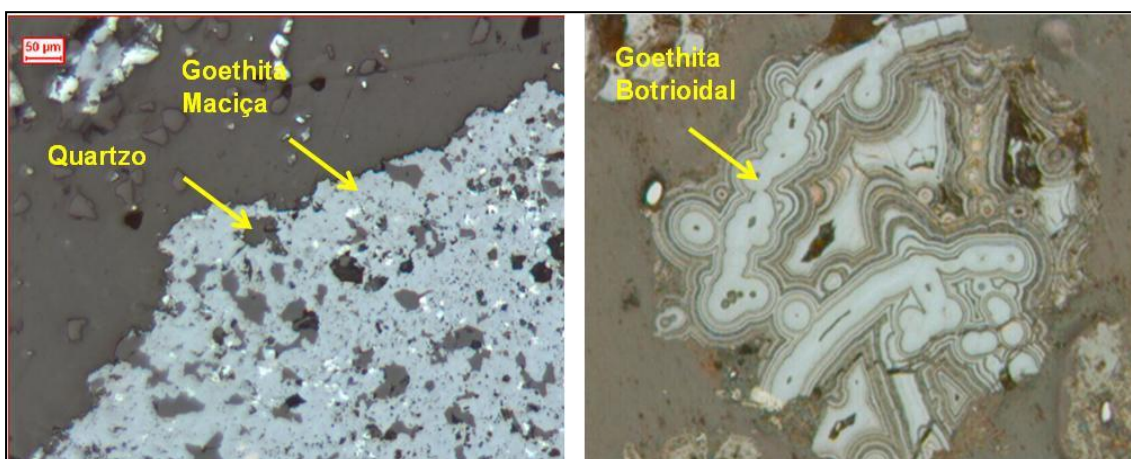


Figura 3. 7 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida – nicóis cruzados. Tipos morfológicos de goethita compacta. (CPT – Centro de Pesquisas Tecnológicas VALE, 2013).

### 3.1.2 Mineralogia do Minério de Ferro - Descrição dos principais minerais de ganga constituintes do minério de ferro

Como mencionado no tópico anterior, além dos minerais portadores de ferro, a mineralogia do minério de ferro também contém os minerais denominados como ganga. Dentre eles, o principal mineral de ganga presente nas jazidas de minério de ferro é o **quartzo** ( $\text{SiO}_2$ ). No entanto, ocasionalmente, a **caulinita** ( $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ ) e a **gibbsita** ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) podem estar presentes, além de outros silicatos e aluminossilicatos. Notadamente, durante os processos de concentração mineral, esses minerais são destinados à barragem de rejeito, sendo então caracterizados como contaminantes do processo.

#### 3.1.2.1. Quartzo

O mineral quartzo é um composto químico de pureza quase completa, formado basicamente por unidades de  $\text{SiO}_2$  (46,7% Si e 53,3% O). Ocorre como um componente importante nas rochas ígneas e metamórficas, sendo extremamente resistente tanto ao ataque químico como físico; apresenta brilho vítreo, fratura conchoidal e forma cristalina. Da mesma forma que a hematita, apresenta-se em diversas formas, sendo as principais: cristal de rocha, ametista, citrino e quartzo leitoso. KLEIN e DUTROW (2012), afirmam que os cristais de quartzo são comumente prismáticos, com as faces do prisma estriadas horizontalmente, no entanto, pode apresentar-se sobre diversos hábitos. Sob análise microscópica, o quartzo é transparente a translúcido, conforme Figura 3.8.

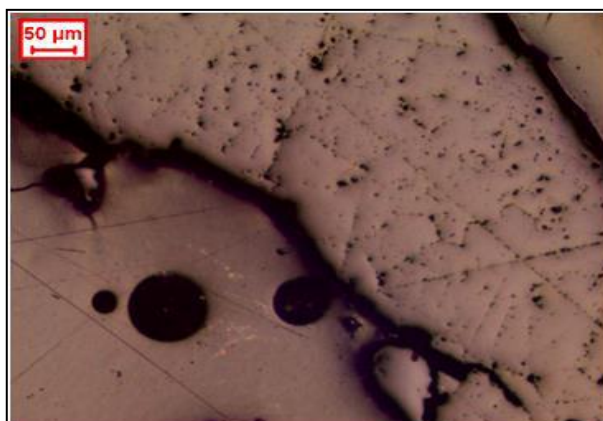


Figura 3.8 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida. Cristais de quartzo. (CPT – Centro de Pesquisas Tecnológicas VALE, 2013).



### 3.1.2.2. Caulinita

A caulinita é um silicato de alumínio hidratado,  $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ , composta por 39,5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 46,5%  $\text{SiO}_2$  e 14%  $\text{H}_2\text{O}$ , (KLEIN e DUTROW, 2012), apresentando-se, frequentemente, como argilas, compactas ou friáveis.

Normalmente, a caulinita apresenta brilho terroso, opaco ou nacarado, não sendo possível a distinção de cristais. Vale ressaltar que na caulinita, os contatos entre os cristais são irregulares e estes geralmente assumem a forma das partículas que os circundam, sendo comum ocorrerem como massa terrosa nos interstícios ou poros de outros minerais, apresentando granulação muito fina ( $< 0,010\text{mm}$ ), conforme Figura 3.9.

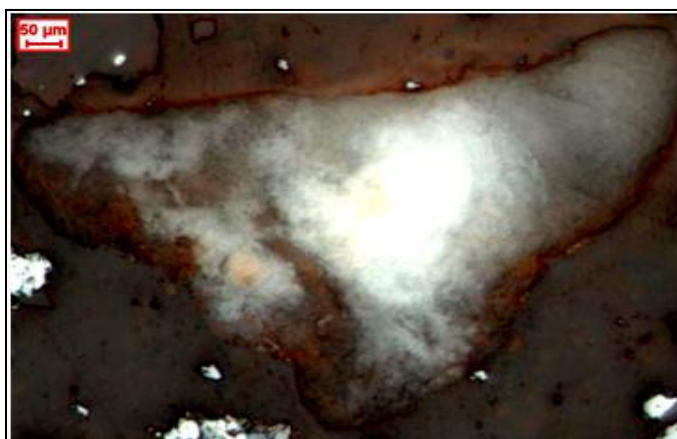


Figura 3.9 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida – nicóis cruzados. Partícula de caulinita (CPT – VALE, 2013).

Com relação à cor, apresenta-se na maioria das vezes na cor branca, contudo, pode apresentar-se colorida, devido à presença de outros elementos/impurezas.

### 3.1.2.3. Gibbsita

A gibbsita, cuja fórmula é  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (composta de 62,8% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 34,12% de perda ao fogo), é o principal mineral constituinte da bauxita. Normalmente encontra-se de forma disseminada, juntamente com a boehmita ( $\mu\text{-AlO}(\text{OH})$ ) e o diásporo ( $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$ ).

Com relação a coloração, é um mineral incolor a marrom pálido, de aspecto sacaróide (grãos análogos a açúcar), sendo necessário cruzarem-se os nicóis para distinção dos cristais, conforme Figura 3.10.

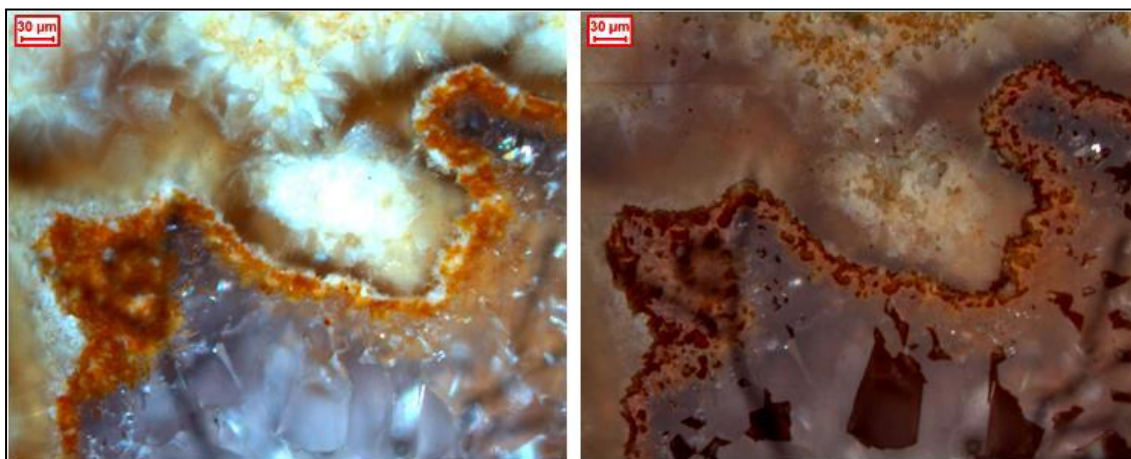


Figura 3.10 Fotomicrografias – microscópio de luz refletida – nicóis paralelos (esquerda) e cruzados (direita). Partículas contendo gibbsita. (CPT – Centro de Pesquisas Tecnológicas VALE, 2013)

Por ser um mineral macio, apresenta polimento ruim. Quanto à porosidade, a mesma não é detectável ao microscópio óptico, geralmente. A gibbsita ocorre comumente nos interstícios ou poros de outros minerais, podendo ocorrer como massa terrosa, associada à goethita terrosa e caulinita, geralmente.

### 3.1.3 Técnicas de Mineralogia Aplicadas a Caracterização Mineral

A mineralogia, conforme mencionado no início desse capítulo, é a ciência voltada para o estudo dos minerais, podendo ser aplicada em diversos ramos. Quando aplicada ao beneficiamento de minério, possibilita o conhecimento das características principais dos minerais contidos em amostras representativas do *run of mine*, o que possibilita ao engenheiro de processo, avaliar, desenvolver e otimizar o processo, atendendo assim as necessidades do mercado.

Dessa forma, conforme NEUMANN et al. (2010), é necessário que as informações colhidas nos estudos de mineralogia aplicada ao beneficiamento não se limitem apenas à identificação dos constituintes da amostra, mas que apresentem

sempre avaliações quantitativas ou semiquantitativas desses constituintes, uma vez que os resultados das investigações mineralógicas qualitativas e quantitativas, juntamente com aquelas fornecidas pelas análises químicas, devem ser suficientes para orientar o planejamento das sequências e/ou etapas adequadas ao beneficiamento.

Embora exista uma diversidade mineral, alguns itens devem ser avaliados, uma vez que são de fundamental importância na caracterização mineralógica aplicada aos processos de beneficiamento. Vale ressaltar que a maioria desses itens pode ser obtida por intermédio de estudos por microscopia óptica, tais como:

- a) Análise mineralógica qualitativa e semiquantitativa;
- b) A determinação do grau de liberação;
- c) As fotomicrografias de situações mineralógicas marcantes que podem ser conclusivas de determinados fenômenos relativos à formação dos minerais do minério;
- d) As identificações mineralógicas por difratometria de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), com microanálise EDS;
- e) Complementação e compatibilização dos estudos mediante os resultados de análises químicas dos elementos principais e os chamados traços.

De posse dessas informações e após análise criteriosa sobre os dados obtidos, o engenheiro de processos poderá indicar as etapas/ rotas de beneficiamento, compreender o comportamento dos minerais frente a cada etapa do processo e definir a qualidade dos produtos obtidos em diferentes tipos de ensaios, por intermédio das identificações mineralógicas dos concentrados e rejeitos, avaliando com isso, o seu respectivo grau de seletividade.

Dessa forma, conforme ressaltado por SANT'AGOSTINO e KAHN (1997), as principais técnicas aplicadas à caracterização mineral, podem ser resumidas conforme Tabela III.1:

Tabela III. 1 Técnicas de mineralogia de uso mais difundido na caracterização de minérios (Sant' Agostino e Kahn, 1997)

Técnica		Propriedades
Microscopia Óptica	Microscópios Estereoscópicos	Forma, Cor, Alterações, Associações, Propriedades Ópticas
	Microscópios Ópticos de Polarização	
Difração de Raio - X	Método do Pó	Estrutura Cristalina
	Câmara de Monocristal	
Microscopia Eletrônica de Varredura	Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	Forma, Associações, Liberação
Sistema de Microanálise	Dispersão de Comprimento de Onda (WDS)	Composição Química
Luminescência	Catodoluminescência	Excitação por Elementos Ativadores
	Fluorescência	
Recursos Diversos	Análise Termodiferencial	Composição Química
	Análise Termogravimétrica	
	Análise por Espectrometria de Infravermelho	

Nesta dissertação foi dada ênfase somente às técnicas adotadas na caracterização do rejeito da barragem alvo desse estudo.

### 3.1.3.1. Espectrometria de Fluorescência de Raios-X

A fluorescência de raios-X é uma técnica voltada para análise química do material de estudo, em que o processo de excitação da amostra deve-se à irradiação por um feixe primário de raios-X, que resulta na produção de uma radiação secundária devido à característica dos elementos químicos presentes. Conhecendo-se os ângulos de reflexão e as intensidades da radiação, é possível, não só identificar esses elementos, como também proceder à quantificação (DUTRA E GOMES, 1984).

A análise por fluorescência de raios-X é um método quali-quantitativo, baseado na medida das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra. Os raios-X emitidos excitam os elementos constituintes da amostra, os quais, por sua vez, emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra.

Quando um elemento de uma amostra é excitado, seus elétrons passam a ocupar um subnível eletrônico de maior energia e, quando retornam ao seu subnível

inicial, emitem fótons de energia característica e bem definida para cada elemento, o que pode ser verificado pela figura esquemática abaixo, Figura 3.11.

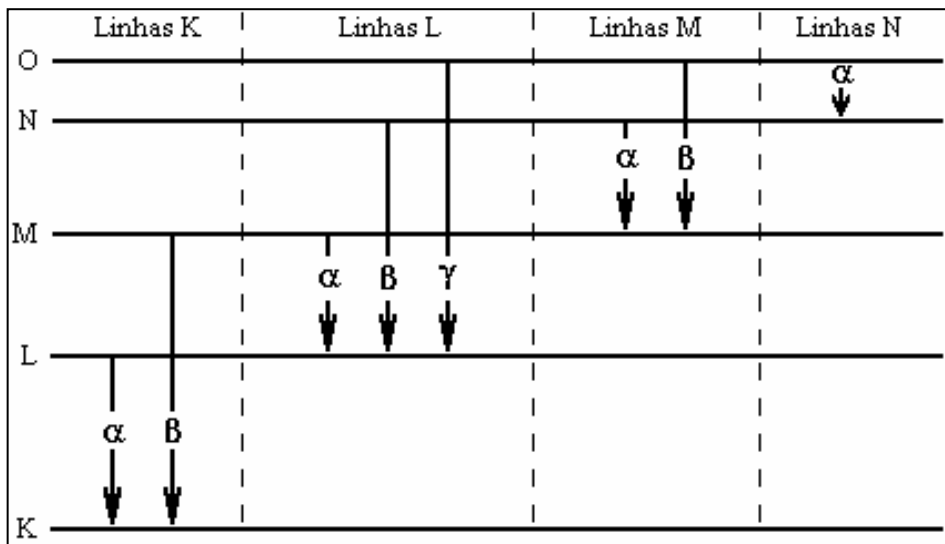


Figura 3.11 Representação esquemática das possíveis transições eletrônicas e suas denominações (PANDOLFO, 2006).

PANDOLFO (2006) ressalta que em função da maneira pela qual os espectrômetros distinguem entre os fótons emitidos pelos diversos elementos de uma amostra, as técnicas de análise podem ser classificadas como EDS (*Energy Dispersive Spectrometry*) ou WDS (*Wavelength Dispersive Spectrometry*).

Em espectrômetros WDS, a radiação policromática do tubo de raios-X incide na amostra e ejetam elétrons de seus átomos, resultando na emissão de fluorescência de raios-X que é dispersa por cristais apropriados; já em espectrômetros EDS, a radiação proveniente da amostra incide diretamente em um detector de estado sólido que tem a propriedade de discriminar os fótons conforme suas energias.

De uma forma resumida, a análise por fluorescência de raios-X consiste de três fases: excitação dos elementos que compõem a amostra, dispersão da radiação característica emitida pela amostra e detecção desta radiação. Vale ressaltar que interferências durante as análises podem causar desvios na quantificação, e devem ser corrigidas e/ou evitadas, seja através de uma preparação de amostras adequada, ou com uma calibração adequada do equipamento.

### 3.1.3.2. Microscopia Óptica

NEUMANN *et al.* (2010) ressaltam que o trabalho em lupa ou microscópio estereoscópico permite análise das amostras em grão, sem necessidade de se montar secções polidas ou delgadas. Os minerais são identificados por cor, brilho, hábito, clivagens e fratura. As observações são feitas sem quaisquer montagens de grãos, e a faixa de aumentos práticos dos microscópios estereoscópicos é de 3 a 40 vezes, para os microscópios ópticos polarizantes, com luz transmitida e/ou refletida, a faixa é de 25 a 1000 vezes.

A análise por microscopia óptica é quase sempre aplicada numa análise preliminar de uma amostra, visando à identificação de minerais mais comuns, avaliação do tamanho dos cristais e estimativa visual de tamanho de liberação.

Conforme a absorção da luz dos minerais a serem analisados, é definido o tipo de microscópio a ser utilizado: para minerais opacos, microscopia de luz refletida, para minerais transparentes, microscopia de luz transmitida. Tendo em vista que a maioria dos minerais a serem avaliados é metálica e por consequência, opacos, é dada ênfase ao microscópio de luz refletida.

Conforme KLEIN e DUTROW (2012), microscópios de luz polarizada adaptados são utilizados para observar seções polidas de minerais sob luz refletida. Para isso, é necessária uma fonte de luz adicional, que é direcionada da objetiva em direção à superfície de um mineral polido. A luz reflete na amostra e retorna pela objetiva até a ocular. Para o uso dessa técnica, é necessário que a amostra tenha um ótimo polimento, semelhante a um espelho, que pode ser feito em uma seção delgada ou em um mineral montado em epóxi e depois polido, conforme Figura 3.12.

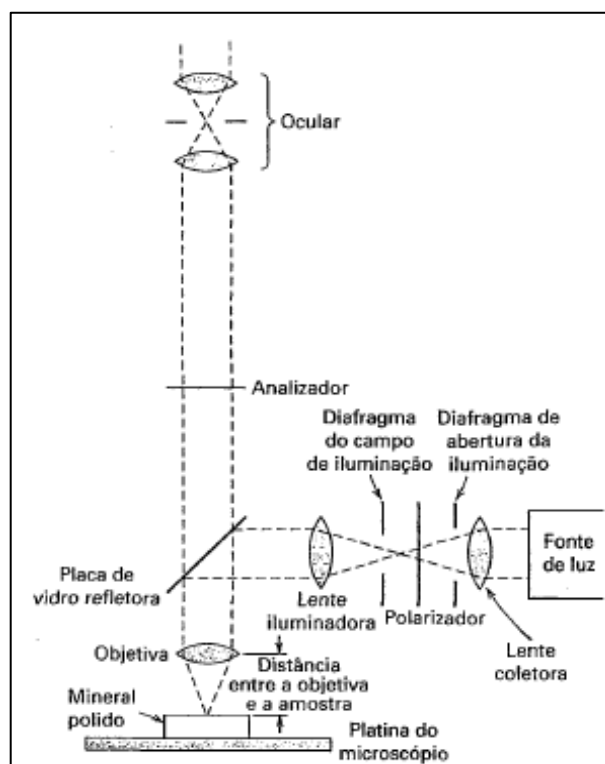


Figura 3.12 Seção transversal esquemática de um microscópio de luz refletida, mostrando a trajetória da luz e alguns dos componentes do microscópio. (KLEIN e DUTROW (2012).

As microscopias de luz refletida, para minerais opacos, são provavelmente os métodos clássicos de identificação de minerais. Nesse caso, a interação da luz (geralmente luz branca do espectro visível) com os minerais é o primordial para a análise, sendo bem eficientes para análises qualitativas.

### 3.1.3.3. Difratometria de Raios-X

Conforme QUEIROZ (2008), a difratometria de raios-X corresponde a uma das principais técnicas de caracterização mineralógica de materiais cristalinos. É uma metodologia que permite a determinação das fases a partir de espectro gerado pela estrutura cristalina, sendo uma ferramenta extremamente útil na identificação das espécies minerais, principalmente os argilominerais. Essa técnica é comumente aplicada em duas modalidades básicas: método do pó e câmaras de monocristal.

Notadamente, os raios-X são radiações eletromagnéticas com comprimentos de onda que se estendem de  $10^3$  a  $10^5$  Å, podendo ser polarizados, refletidos e difratados, sendo produzidos pelo bombardeio do anodo por elétrons do catodo, acelerados por

alta voltagem. O feixe monocromático de raios-X que incide na amostra é então difratado em cada plano cristalino, provocando uma interferência construtiva, detectada pelo contador de radiação e traduzida em termos de sinal eletrônico para um registrador gráfico, conforme relatado por BRANDÃO (2015).

Com relação à metodologia adotada, o método do pó é o mais utilizado, em que a câmara de Debye-Scherrer foi sendo substituída progressivamente pelo difratômetro de raios-X, como apresentado na Figura 3.13.

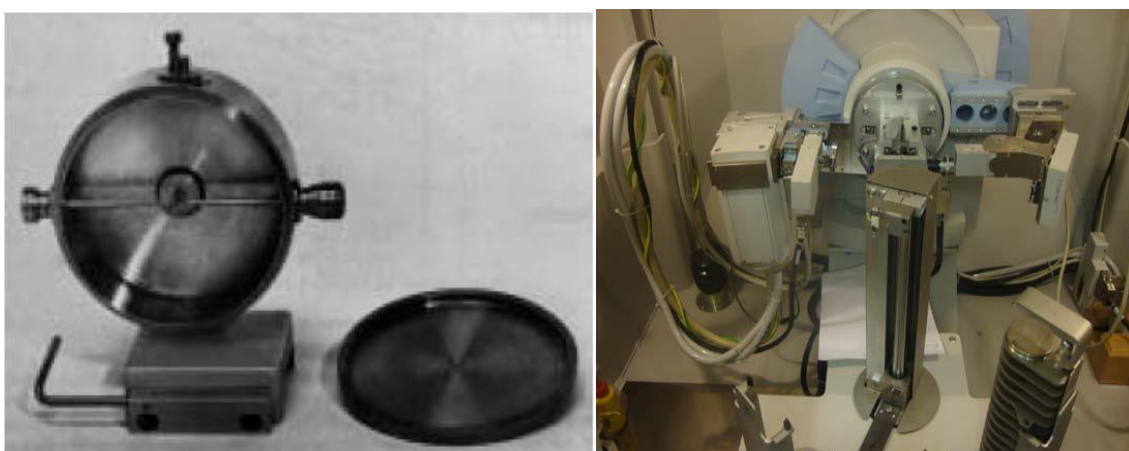


Figura 3.13 Da esquerda para a direita: câmara de pó ou de Debye-Scherrer (Kahn, 2001); difratômetro de raios-X, marca PANalytical, modelo X'Pert PRO (Fernandes, 2012).

Como essa técnica está voltada basicamente para a identificação de compostos cristalinos, várias estratégias de identificação podem ser empregadas, contudo, vale ressaltar que a dificuldade de identificação aumenta progressivamente, com a elevação do número de fases cristalinas presentes na amostra.

A fim de facilitar essa etapa da análise, sistemas automáticos foram criados, de modo que os três a dez picos mais intensos de cada fase, encontrados no banco de dados existente dos compostos cristalinos, são comparados com o difratograma da amostra. Uma vez feita essa “comparação”, os resultados são expressos em ordem decrescente, dependendo da análise final do pesquisador, conforme Figura 3.14.

A técnica de difração de raios-X requer pequena quantidade de amostra (< 1g), além de ser um procedimento de baixos custos operacionais e rápido quando totalmente automatizado.



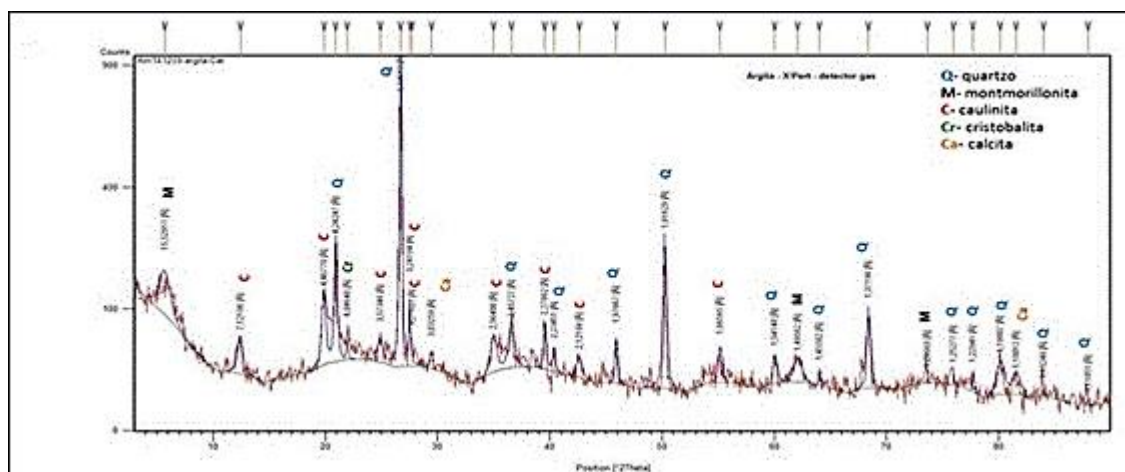


Figura 3.14 Difratoograma de uma argila (BRANDÃO, 2015).

#### 3.1.3.4. QEMSCAN

Conforme citado por JENA *et al.* (2015), QEMSCAN é um sistema automatizado de mineralogia, que fornece informações mineralógicas completas, como análise e liberação mineral para minérios e rochas.

Segundo JACKSON *et al.* (1989) apud GONÇALVES, (2015) o QEMSCAN é uma técnica que possibilita a automatização do microscópio eletrônico de varredura, devido à presença de um sistema moderno de software e hardware. Este microscópio eletrônico é composto por um conjunto de detectores de sinais de elétrons retroespalhados e por dispersão de energia de raios-X (EDS), que permitem identificar o mineral pelo seu brilho e composição química. As informações geradas são comparadas a uma lista mineral pré-definida denominada SIP (*Species Identification Protocol*), que possibilita a identificação e quantificação do mineral a partir da composição química e espectros padrões.

Vale ressaltar que o QEMSCAN possibilita identificar espécies minerais individuais ou fornecer conjuntos de minerais com semelhança química. Dessa forma, após a detecção dos sinais dos elétrons retroespalhados e dos espectros gerados por dispersão de energia de raios-X, em cada ponto, o QEMSCAN compara essas informações com uma lista mineral pré-definida denominada SIP (*Species Identification Protocol*) que permite a identificação do mineral a partir da composição química e espectros padrão.

Conforme citado por GONÇALVES (2012) em seu trabalho, o QEMSCAN é composto pelo *iDiscover*, o qual é um conjunto de softwares demonstrados na Figura 3.15. Esses softwares permitem a realização das medições, importação, tratamento, exportação e armazenamento dos dados coletados.

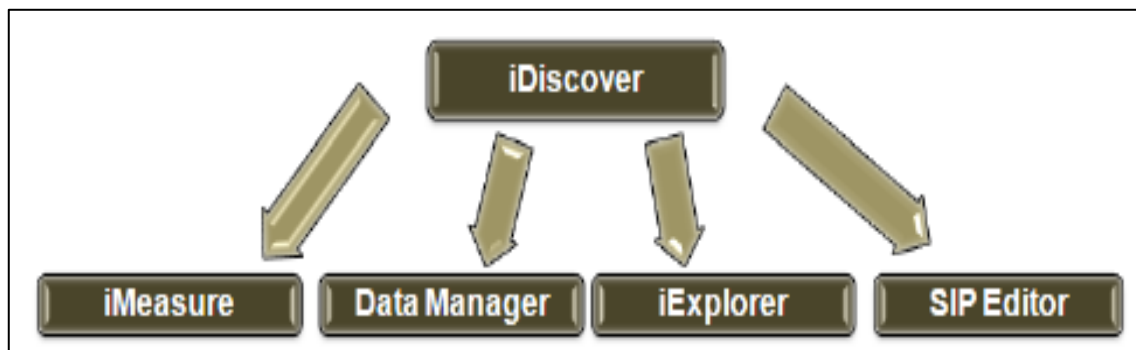


Figura 3.15 Fluxograma dos conjuntos dos softwares que compõem o *iDiscover* do QEMSCAN (GONÇALVES, 2012).

O sistema QEMSCAN permite realizar vários tipos de análises, as quais permitem avaliar a assembleia mineralógica ou determinar minerais de interesse. A seguir são apresentados os modelos de análises disponíveis:

a) **BMA (*Bulk Mineral Analysis*)**: caracteriza-se por ser uma medição rápida, própria para obtenção de quantificação mineralógica das fases. Esse modelo fornece estimativa do tamanho dos cristais e partículas, além de dados de granulação, sem a precisão do método PMA (*Particle Mineral Analysis*), que é detalhado a seguir;

b) **PMA (*Particle Mineral Analysis*)**: caracteriza-se por fornecer mapas das partículas. Os mapas gerados são ideais para gerar informações sobre liberação, caracterização textural, quantificação mineralógica e granulação;

c) **SMS (*Specific Mineral Search*)** e **TMS (*Trace Mineral Search*)**: estes métodos não analisam toda amostra, apenas as partículas que possuem os minerais de interesse. A TMS assume que a partícula contém menor proporção do mineral de interesse (utilizada para rejeitos) e a SMS é aplicada quando a concentração da fase de interesse é maior;

d) **FieldImage**: apresenta semelhança com a análise BMA, contudo a diferença está na direção do campo de varredura, sendo uma medição bidimensional e apresenta a mesma distância de análise nas duas direções (x e y), permitindo obter informações sobre textura das partículas analisadas.

### 3.2. Tópico de Rotas de Beneficiamento de Minérios – Partículas <1mm

Conforme mencionado no capítulo anterior, **Técnicas de Mineralogia Aplicadas a Caracterização Mineral**, a partir do conhecimento da mineralogia e das características físico-químicas dos minerais, o engenheiro de processos consegue aperfeiçoar seus processos e até mesmo, desenvolver novas rotas de beneficiamento.

Tendo em vista a necessidade de minimizar os passivos ambientais gerados pelo processo de beneficiamento mineral, a recuperação dos rejeitos gerados durante os processos das Usinas de Beneficiamento é de fundamental importância. Dessa forma, a definição de uma rota de processo que possibilite transformar o rejeito em produto a cada dia torna-se cada vez mais relevante.

Sendo assim, esse capítulo mostra tópicos de operações unitárias aplicadas para beneficiamento de partículas menores que um milímetro, granulometria essa encontrada na maioria das barragens de rejeito, com foco nas etapas de classificação (ciclonação), concentração (concentração magnética) e separação sólido-líquido (espessamento e filtração).

#### 3.2.1. Classificação

Conforme mencionado por WILLS & NAPIER-MUNN (2006), a classificação é um método de separação dos minerais em dois ou mais produtos, com base na velocidade com que os grãos de minerais percorrem ao longo do fluido. Durante processo de beneficiamento mineral, normalmente usa-se água, e esse processo é geralmente aplicado a partículas minerais finas de modo que não podem ser classificadas via peneiramento. Vale ressaltar que essa é uma operação unitária primordial, anterior a etapa de concentração mineral. A teoria que norteia esse processo está voltada para o movimento das partículas no meio fluido, o qual pode ser em queda livre ou em queda retardada.

Para o movimento em queda livre, durante o processo de sedimentação, a partícula está imersa em um fluido e tende, sob a ação da gravidade, a percorrer uma distância teoricamente infinita. Considerando que as partículas são esféricas e

pequenas ( $r < 50\mu\text{m}$ ), o regime é considerado laminar. Para partículas esféricas e grossas ( $r > 50\mu\text{m}$ ), o regime passa a ser turbulento. Dessa forma, a velocidade terminal da partícula, em um dado fluido, é função apenas do tamanho e da densidade da mesma, concluindo-se, portanto, que:

- a) Se duas partículas têm a mesma densidade, a partícula com maior tamanho terá maior velocidade terminal;
- b) Se duas partículas têm o mesmo tamanho, a partícula mais densa terá maior velocidade terminal.

Para o movimento em queda retardada, também conhecida como sedimentação em queda impedida, o movimento da partícula ocorre em uma polpa. Dessa forma, conforme CORREIA (2010), com o aumento da densidade da polpa, o movimento de sedimentação de cada partícula é influenciado pelo movimento das demais e pelo deslocamento da água através dos espaços entre as partículas, o que resulta para esta partícula, uma velocidade terminal de sedimentação menor do que a de queda livre.

A partir de inúmeros estudos na área, foram desenvolvidos vários tipos de classificadores conforme a aplicabilidade necessária e mecanismo de classificação das partículas, o qual está relacionado principalmente ao fluxo da corrente de carga. Dessa forma, as partículas introduzidas em uma coluna de separação, podem subir ou descer, conforme as suas velocidades terminais, dando origem a dois produtos: um *overflow*, composto de partículas com velocidade terminal menor que a velocidade do fluido e um *underflow*, composto de partículas com velocidade terminal maior do que a velocidade do fluido. (Figura 3.16).

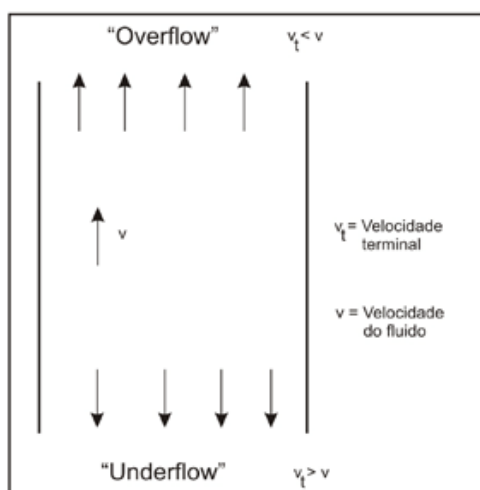


Figura 3.16 Representação esquemática de um classificador (CORREIA, 2010)

No conceito atual, os equipamentos adotados para a classificação de minérios podem ser **horizontais**, normalmente aplicados nas etapas em que a decantação das partículas ocorre facilmente, ou **verticais**, esses já aplicados em etapas em que o processo de decantação é mais demorado, sendo necessário fazer uso de outras variáveis de processo para facilitar a separação das partículas, tais como a densidade das mesmas. No grupo dos classificadores horizontais, pode-se citar os *cones de sedimentação*, os *classificadores mecânicos* e *classificadores espirais*; já os classificadores verticais, atualmente estão sendo substituídos pelos hidrociclones, na maioria das aplicações.

Neste capítulo, são enfatizados os hidrociclones, devido à aplicabilidade dos mesmos no estudo em questão.

#### 3.2.1.1. Hidrociclonagem

Conforme WILLS e NAPIER-MUNN (2006), o hidrociclone é um equipamento de funcionamento contínuo, que utiliza a força centrífuga para acelerar o processo de sedimentação de partículas. É um dos mais importantes dispositivos utilizados na mineração, sendo a sua principal aplicação no processamento mineral como um classificador, provando ser extremamente eficiente na separação de partículas menores.

Com relação ao processo, a polpa, constituída por partículas de granulometria diversas, é injetada sob pressão no equipamento, através de um duto situado na parte superior da câmara cilíndrica. Durante o processo de classificação, as partículas mais grossas e conseqüentemente, mais densas, são arremetidas às paredes e descarregadas na abertura inferior, o apex, constituindo o *underflow*. Já as partículas mais finas, de menor densidade, e grande parte da fase líquida são dirigidas para o centro do hidrociclone e em seguida, saem pela parte superior do aparelho, denominado vortex finder, constituindo o *overflow*.

Esquemáticamente, um hidrociclone típico consiste de um câmara cilíndrico-cônica, com uma entrada de alimentação tangencial a parte cilíndrica e duas saídas: uma interligada a parte cônica, denominada de *apex*, e a outra interligada a parte cilíndrica, denominada de *vortex finder*, conforme Figura 3.17.

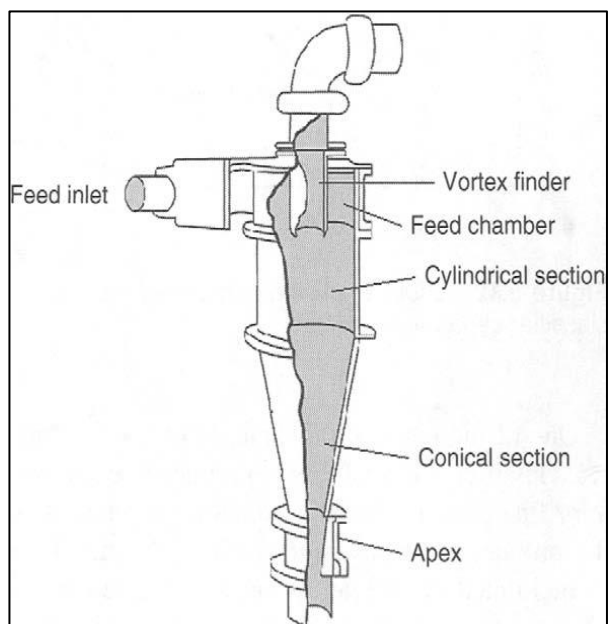


Figura 3.17 Representação esquemática de hidrociclone (Napier-Munn et al.,2006).

Vale salientar que, no interior dos hidrociclones, há quatro zonas distintas de trabalho, conforme Figura 3.18.

**Zona A:** área em que alimentação não é classificada, pois a polpa fica numa região adjacente à parede do cilindro e superior do ciclone;

**Zona B:** ocupa grande parte do cone do ciclone e contém material grosseiro classificado integralmente, isto é, a distribuição de tamanho está praticamente uniforme e se assemelha a do produto *underflow*;

**Zona C:** área ocupada por material fino totalmente classificado;

**Zona D:** área em que a classificação parece realmente estar ocorrendo. Através desta região, frações de tamanhos estão distribuídas radialmente, de modo que os tamanhos estejam decrescentes ao eixo.

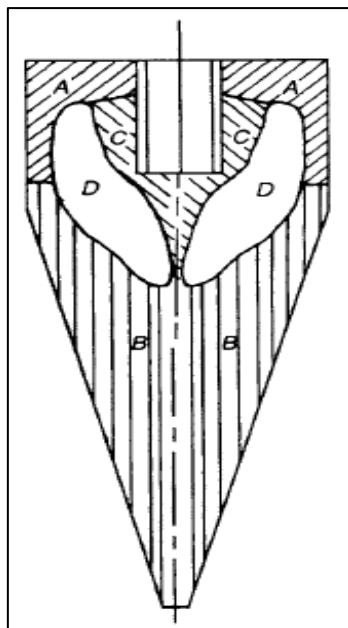
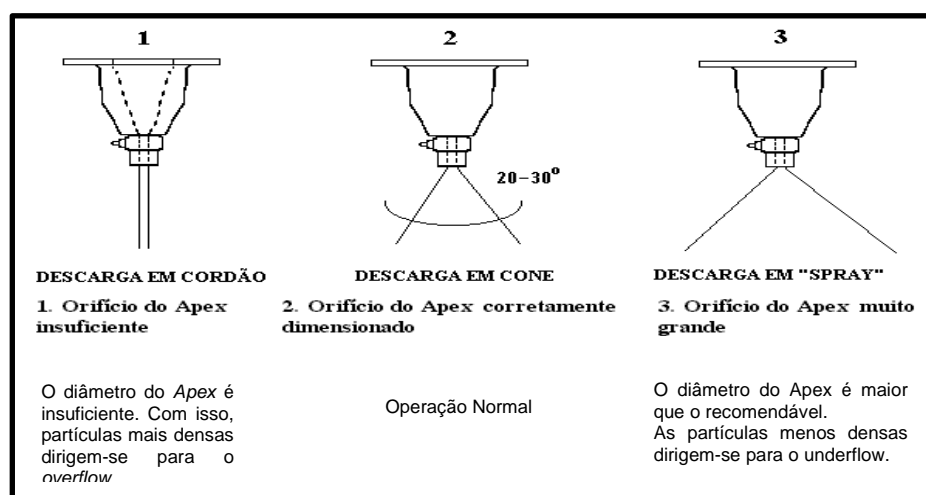


Figura 3.18 Regiões de distribuição de tamanho semelhante dentro de ciclone (Napier-Munn et al.,2006).

No que diz respeito a aplicabilidade, segundo TRAWINSKI (s.n.t apud CORREIA, 2010), os hidrociclones apresentam funções diversas, tais como **espessamento** (elimina a maior parte da água de uma polpa), a **deslamagem** (elimina as partículas mais finas, necessário antes dos processos de concentração), **classificação** (utilizado em circuitos fechados de moagem, onde o *underflow* do hidrociclone retorna ao moinho), **classificação seletiva** (por meio de uma configuração de hidrociclones em série, é possível obter-se um conjunto de produtos com granulometria definida) e a **pré-concentração** (utilizando hidrociclones de fundo chato, pode-se realizar concentração por gravidade onde os minerais mais densos são descartados pelo *underflow*).

Com relação a performance do equipamento, vale salientar a importância da geometria do hidrociclone (**diâmetro de ciclone**, **diâmetro de *vórtex finder*** e do **apex**, **altura da seção cilíndrica**), bem como as condições operacionais (**pressão** e **percentual de sólidos**). De forma resumida, tem-se os seguintes impactos:

- a) Diâmetro de ciclone: define a capacidade e o diâmetro de corte dos hidrociclones;
- b) Diâmetro de *vórtex finder*: a variação de seu diâmetro possibilita regular a capacidade e o diâmetro de corte;
- c) Altura da seção cilíndrica: aumentando a altura, diminui o diâmetro de corte;
- d) Diâmetro do *apex*: dependendo do tipo de descarga do *apex*, pode-se avaliar as condições de operação do equipamento. Normalmente, observa-se três tipos de comportamentos: **descarga em cordão, em cone e pulverizador (spray)**, conforme Figura 3.19;



- e) Pressão: aumentando a pressão, o diâmetro de corte diminui;
- f) Percentual de sólidos: aumentando a percentagem de sólidos na polpa, o diâmetro de corte aumenta até um determinado limite e depois, diminui.

Com relação a eficiência no processo, conforme WILLS & NAPIER-MUNN (2006), o método mais comum de representar a eficiência de um ciclone é por uma curva de desempenho ou partição (Figura 3.20), que se refere a fração de peso, ou percentagem, de cada tamanho de partícula na alimentação que se reporta ao ápice, ou capacidade insuficiente, ao tamanho da partícula.



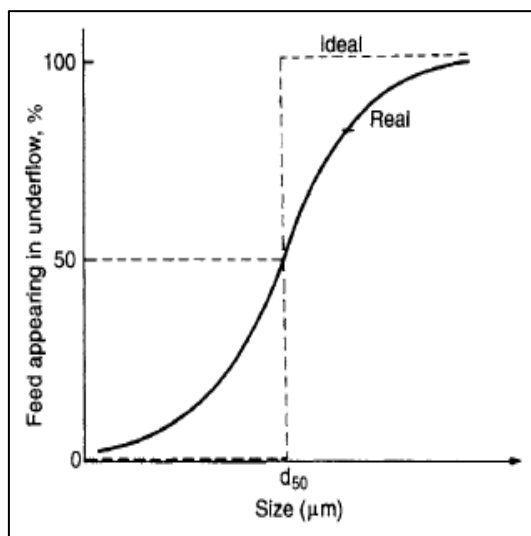


Figura 3.19 Curva de partição típica de hidrociclone. (Napier-Munn et al.,2006).

O ponto de corte do ciclone é definido como o tamanho para o qual 50% das partículas na alimentação podem ser recuperadas, denominado de  $d_{50}$ . A eficiência do corte depende da inclinação da seção central da curva de partição, sendo que quanto mais perto da vertical, maior é a eficiência. A inclinação da curva pode ser calculada tomando os pontos em que 25% e 75% das partículas seguem para o *underflow*, os quais são denominados respectivamente de  $d_{25}$  e  $d_{75}$ .

Devido à imperfeição no processo, a curva fica inclinada, formando áreas em que partículas finas dirigem-se ao *underflow* e partículas grossas ao *overflow*.

### 3.2.2. Concentração

Conceitualmente, a concentração é uma das operações unitárias em que ocorre a separação por espécie. Conforme SALES (2012), a concentração de minério de ferro se baseia, genericamente, na destinação de partículas minerais portadoras de ferro (óxidos, oxi-hidróxido) para o fluxo de concentrado e partículas não portadoras de ferro (hidróxido: gibbsita e ganga silicatada) para o fluxo de rejeito.

De acordo com PERES *et al.* (2007), a separação é realizada em sistemas dinâmicos onde a resultante de um jogo de forças confere trajetórias diferentes às partículas, de tal modo que se possa separá-las com base em uma propriedade, sendo

essa definida como **propriedade diferenciadora**, tais como cor, brilho, densidade, susceptibilidade magnética, condução de cargas e propriedades de superfície (naturais ou induzidas), dentre outras.

Para cada tipo de propriedade diferenciadora, há um método de concentração mineral aplicado, conforme Tabela III.2.

Tabela III. 2 Métodos de concentração baseado na propriedade diferenciadora dos minerais (modificado de Araújo et al., 2008)

PROPRIEDADES	MÉTODOS
Ótica (cor, brilho, fluorescência).	Escolha ótica (manual ou automática)
Densidade.	Líquido denso, meio denso, jigues, espirais, cones, ciclones de meio denso, bateias, calhas, classificadores, concentradores centrífugos.
Susceptibilidade magnética.	Concentração magnética.
Condutividade elétrica.	Separação eletrostática ou de alta tensão.
Radioatividade.	Escolha com contador.

Dessa forma, cada propriedade está associada a um ou mais métodos específicos, sendo que para cada faixa granulométrica há um método de concentração mais apropriado, e, por conseguinte, podem estar diretamente associados à qualidade granulométrica dos principais produtos: granulados, *sinter feed* e *pellet feed*.

Segundo ROBERTO (2010, apud SALES, 2012), quando os métodos de concentração são usados para os finos e superfinos, procura-se primordialmente remover os minerais de ganga presentes no próprio minério. Em determinados minérios, o simples peneiramento é suficiente para enriquecer faixas granulométricas acima de 1,0mm, como é o caso do granulado e *sinter feed* grosso, produzidos em Carajás.

Caso as especificações de produto, exigidas pelo mercado, não sejam alcançadas via peneiramento, faz-se necessário a utilização de outros métodos, tais como a jigagem para se alcançar maiores fatores de enriquecimento nesta fração.

No caso de minérios com faixa de tamanho menor que 1,0mm e com grande percentual de magnetita, geralmente é aplicado método de concentração magnética,

seja nos concentradores de baixa e média intensidade. As hematitas, presentes nesta mesma fração, podem ser concentradas por concentradores magnéticos de alta intensidade que operam a úmido – WHIMS.

Quando a fração a ser concentrada está abaixo de 0,15mm, notadamente aplica-se a flotação, método que é baseado na reatividade de superfície. Dentre todas as operações unitárias de concentração, a flotação é a que apresenta as maiores eficiências de separação e seletividade.

Vale salientar, que apesar da concentração magnética (-1,0 +0,15mm), e flotação (-0,15mm) serem as operações mais empregadas nestas faixas de tamanho, algumas usinas de beneficiamento já empregaram concentradores espirais para minérios finos, abaixo de 1,0mm, como foi o caso da mina de Gongo Soco, com a ITM3.

Para que o processo de concentração ocorra com eficiência, conforme PERES (2015), além da existência das propriedades supracitadas, também são necessárias três condições básicas:

- a) Liberalidade: a liberação dos grãos dos diferentes minerais é obtida através de operações de fragmentação (britagem e moagem), intercaladas com etapas de separação por tamanho;
- b) Separabilidade dinâmica: está absolutamente ligada aos equipamentos empregados;
- c) Diferenciabilidade: é base da seletividade do método. Para a flotação, a seletividade baseia-se no fato de que a superfície de diferentes espécies minerais pode apresentar distintos graus de hidrofobicidade; no caso da concentração magnética, as partículas devem apresentar diferentes níveis de susceptibilidade magnética; e na concentração gravítica, diferentes pesos específicos.

Neste capítulo, é dada ênfase ao processo de concentração magnética, devido a aplicabilidade dos mesmos no estudo em questão.

### 3.2.2.1. Concentração Magnética

A separação magnética pode ser empregada, dependendo das diferentes respostas ao campo magnético associadas, às espécies mineralógicas individualmente durante processo de beneficiamento mineral.

Conforme SAMPAIO *et al.* (2010), a propriedade de um mineral que determina sua resposta a um campo magnético é chamada de susceptibilidade magnética. Com base nessa propriedade, os materiais ou minerais são classificados em duas categorias, aqueles que são atraídos pelo campo magnético (ferromagnéticos e paramagnéticos) e os que são repelidos por ele (diamagnéticos). Abaixo segue descrição de cada tipo de mineral:

- a) Minerais ferromagnéticos: são atraídos fortemente pelo campo magnético (magnetita e pirrotita);
- b) Minerais paramagnéticos: são fracamente atraídos pelo campo magnético (hematita, wolframita, goethita);
- c) Minerais diamagnéticos: são repelidos pelo campo magnético (quartzo).

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

Dessa forma, a aplicabilidade dos equipamentos no processo de concentração magnética para minério de ferro, está absolutamente relacionada a essa propriedade dos minerais, ou seja, partículas ferromagnéticas são concentradas em equipamentos de baixa a média intensidade de campo magnético e as paramagnéticas nos de alta intensidade.

Os estudos acerca da separação magnética permitiram desenvolver equipamentos que pudessem separar materiais fracamente magnéticos, mesmo que sob a forma de partículas finamente dispersas. Com relação aos tipos de equipamentos, há dois modelos clássicos, muito utilizados tanto em escala piloto como industrial, distinguidos pela intensidade de campo magnético implantado. Para campo de baixa e média intensidade, há o WDRE (*Wet rare earth drum*) e para campo de alta intensidade, o WHIMS (*Wet high intensity magnetic separator*).

SAMPAIO (2010) afirma que esses estudos resultaram no desenvolvimento da separação magnética de alta intensidade (*high intensity magnetic separation - HIMS*), posteriormente denominado WHIMS, separadores a úmido (*wet high intensity magnetic separation*). Outro desenvolvimento que contribuiu também para inovação tecnológica foi a introdução de matrizes (placas com ranhuras ou metal expandido, malhas, bolas), no campo magnético do separador. Essas matrizes, quando magnetizadas, geram um gradiente magnético local, resultando em maior força magnética que atua sobre a partícula, conforme Figura 3.21.

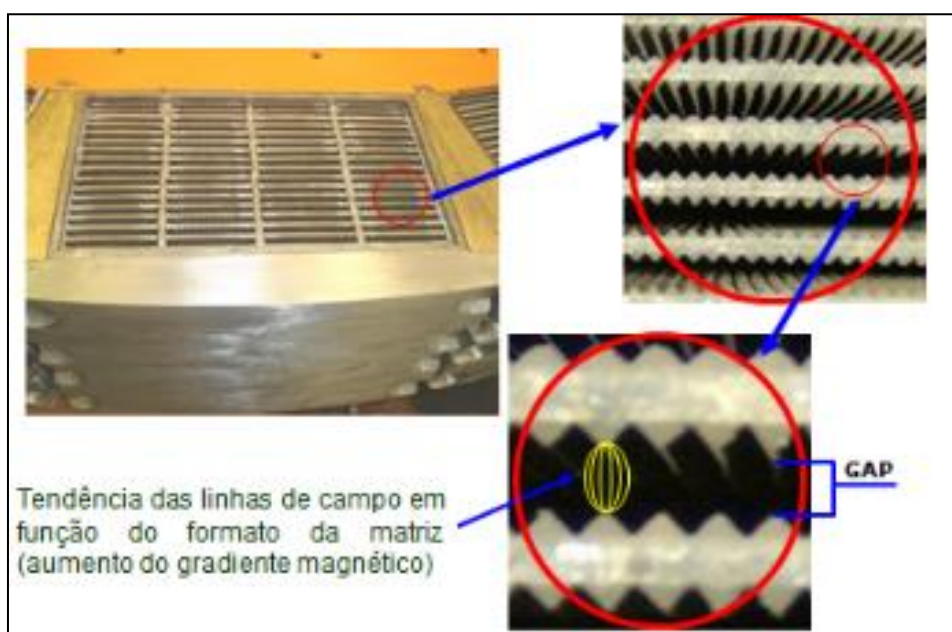


Figura 3.20 Representação das matrizes (VALE, 2014).

Dessa forma, pela própria definição, o concentrador WHIMS, também conhecido por concentrador JONES, é um separador magnético de alta intensidade, logo, notadamente é aplicado em processos de beneficiamento de minerais paramagnéticos, devido à dificuldade da separação dos mesmos.

Conforme de PAULA (2014), nos separadores magnéticos de alta intensidade a separação ocorre nos pacotes magnéticos localizados na circunferência de dois rotores equipados com certo número de placas ranhuradas equidistantes umas das outras, conforme pode ser verificado na Figura 3.22.

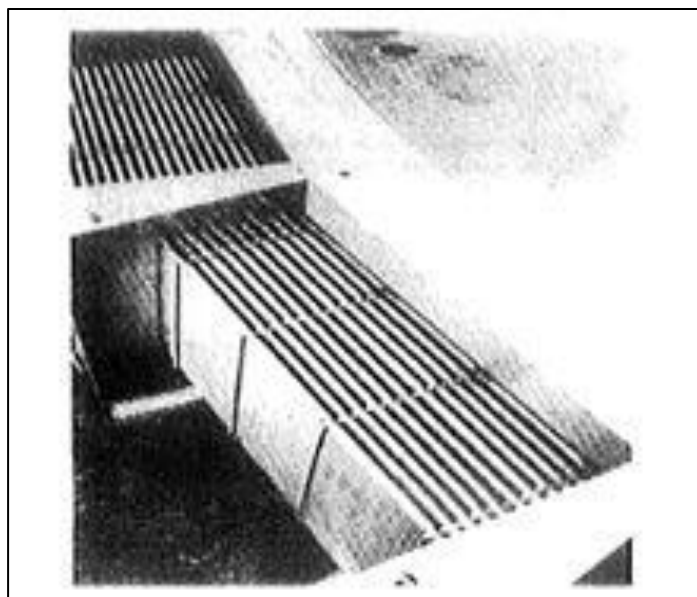


Figura 3.21 Ilustração dos pacotes magnéticos localizados na circunferência de dois rotores (de Paula, 2014).

Segundo QUEIROZ (2008), o arraste hidrodinâmico prevalece sobre a força magnética a medida que as partículas e/ou cristais a serem concentrados apresentam porosidade elevada e granulação inferior a  $70\mu\text{m}$ , para matrizes com GAP de 3,8mm e  $45\mu\text{m}$  para matrizes com GAP de 2,5mm. Contudo, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas para concentração de *pellet feed*, na recuperação de lamas ou de minérios proveniente de barragens. A Figura 3.23 mostra um desenho esquemático do concentrador WHIMS, com as suas principais partes:

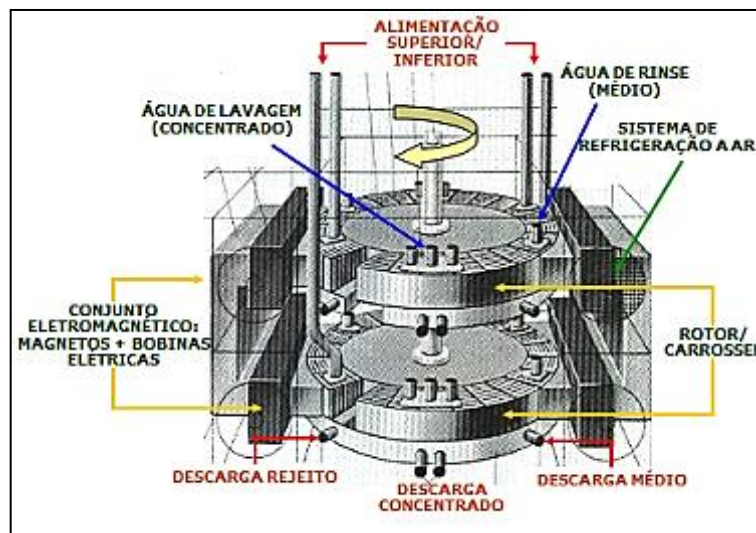


Figura 3.22 Desenho esquemático de concentrador magnético (VALE, 2014).

**a) Sistema de Alimentação:** A alimentação é feita por tubos fixos, sendo que ao final de cada tubo, existe uma caixa de alimentação que diminui a velocidade da polpa e ajuda a evitar que o material passe direto pelas matrizes. Nos equipamentos tradicionais cada rotor recebe duas alimentações, contudo já foi desenvolvido separadores com 4 e 6 pontos de alimentação por rotor, nesses separadores não há descarga de médio, e dessa forma, a qualidade do concentrado pode ser afetada;

**b) Sistema de Refrigeração:** As bobinas dos separadores podem ser refrigeradas a ar ou à óleo. A capacidade do sistema de resfriamento define a máxima corrente que pode ser utilizada, e por consequência o campo magnético máximo do equipamento (a refrigeração a ar é utilizada para campos de até 9000 Gauss);

**c) Rotor/Carrossel:** Anel móvel que recebe a alimentação, conduzindo a polpa a atuação do campo magnético e ao sistema de lavagem de produtos. Tradicionalmente os WHIMS possuem 2 rotores, porém já foi desenvolvido separadores com 3 rotores (WHC 600 – Inbrás) para maximização da capacidade. Os rotores são compostos de matrizes ferromagnéticas dispostas ao redor do anel;

**d) Magnetos/Bobinas Elétricas:** O concentrador magnético WHIMS funciona a partir da indução de um campo magnético pela passagem de corrente elétrica nas bobinas;

**e) Matrizes Ferromagnéticas:** São placas de aço providas de ranhuras com a finalidade de aumentar o gradiente magnético. A intensidade do campo magnético no interior das matrizes pode chegar 15.000G, conforme a abertura (gap) das matrizes, o gradiente magnético e a corrente elétrica aplicada nas bobinas. Vale

salientar que quanto maior a abertura, maior a capacidade do separador magnético, porém, menor o campo magnético aplicado. A abertura das matrizes deve ser pelo menos o dobro do *top size* da alimentação para evitar entupimentos;

**f) Sistema de Lavagem de produtos:** O sistema é composto por jatos sprays fixos utilizados para desprender o material magnético das matrizes ferromagnéticas. O equipamento possui jatos para descarga de médio (água de rinse – baixa pressão) e para descarga de concentrado (água de lavagem – alta pressão), lembrando que a pressão de água de lavagem é uma das variáveis de processo, em que, quanto maior a pressão, melhor a qualidade do concentrado e menor a recuperação em massa;

**g) Descarga de Produtos:** Os produtos gerados na separação são direcionados ao ponto de descarga por um sistema de canaletas e para cada ponto de alimentação se têm uma calha de concentrado, uma de médio e uma de rejeito.

Com relação a performance do equipamento, vale salientar a importância do **gap entre as placas, percentagem de sólidos na alimentação, taxa de alimentação, velocidade de rotação dos rotores, intensidade do campo magnético, pressão da água de lavagem médio e de concentrado**. De forma resumida, tem-se os seguintes impactos:

**a) Gap entre as placas:** quanto maior o gap, menor a recuperação em massa e menor teor de  $\text{SiO}_2$  no concentrado;

**b) Percentagem de sólidos na alimentação (densidade):** quanto maior a densidade, maior a recuperação em massa e maior teor de  $\text{SiO}_2$  no concentrado;

**c) Taxa de alimentação:** quanto maior a taxa de alimentação, menor a recuperação em massa e maior teor de  $\text{SiO}_2$  no concentrado;

**d) Velocidade de rotação dos rotores:** quanto maior a velocidade de rotação dos rotores, maior teor de  $\text{SiO}_2$  no concentrado;

**e) Intensidade do campo magnético:** quanto maior a intensidade do campo magnético, maior a recuperação em massa e maior teor de  $\text{SiO}_2$  no concentrado;

**f) Pressão da água de lavagem médio:** quanto maior a pressão da água de lavagem de médio, menor a recuperação em massa e menor teor de  $\text{SiO}_2$  no concentrado;

**g) Pressão da água de lavagem concentrado:** quanto maior a pressão da água de lavagem no concentrado, maior a recuperação em massa.



### 3.2.3. Separação Sólido-Líquido.

Sendo considerada a última etapa dentro de uma rota de beneficiamento de minérios, a operação unitária separação sólido-líquido é uma etapa muito importante, uma vez que possibilita não somente a recuperação da massa de sólido contido na polpa, mas principalmente, da água ali presente, a qual deverá retornar ao processo como um líquido clarificado (*água de processo*). Além disso, na maioria dos casos, a separação sólido-líquido torna-se uma das fases mais relevantes dentro do processo, uma vez que além da complexidade existente de algumas operações, há também o elevado custo associado a manutenção do ativo.

Conforme FRANÇA (2010), quando se trabalha com polpas minerais, é importante que a operação de separação sólido-líquido seja escolhida mediante a observação de características da polpa, como a concentração de sólidos: as polpas diluídas com baixas concentrações de sólidos geralmente requerem algum tipo de pré-tratamento (concentração) antes da etapa de desaguamento, já as com maior concentração podem ser processadas diretamente nos equipamentos de desaguamento propriamente ditos.

Com relação aos equipamentos a serem adotados, há vários modelos no mercado, cada um com aplicabilidade definida. Segundo SILVERBLATT e EASTON (2002 *apud* FRANÇA, 2010), há alguns critérios que devem ser considerados na escolha do equipamento apropriado ao fluxo proposto, tais como:

- a) Objetivos do processo de separação e qual o efeito da eficiência desse processo no fluxograma de beneficiamento;
- b) Tipo da operação, se contínua ou em batelada;
- c) Deve-se saber qual a sua vazão de alimentação, concentração de sólidos, distribuição granulométrica e densidade dos sólidos da polpa de minérios;
- d) Necessidade de pré-tratamento da polpa, como coagulação/floculação, tipo reagentes a serem utilizados (orgânicos ou inorgânicos) e características e resistência requeridas para os flocos;
- e) Quantidade de sólidos solúveis e umidade final requerida para a torta de filtração;

f) Para a fase líquida, deve-se saber qual a turbidez requerida e a quantidade de sólidos suspensos, além da necessidade e adequação de auxiliares de filtração.

Tendo como base os critérios anteriormente citados e inúmeros estudos na área, foram desenvolvidos vários tipos de equipamentos conforme a aplicabilidade necessária, características das partículas envolvidas/ comportamento dinâmico das mesmas e concentração de sólido na polpa. Neste capítulo, são focadas as operações de espessamento e filtragem, devido a sua aplicabilidade neste estudo.

### 3.2.3.1. Espessamento

Conforme VALADÃO e ARAUJO (2007), o espessamento é a operação de separação sólido-líquido baseada na sedimentação, utilizada para: recuperação de água de polpas contendo rejeitos ou concentrados, preparação de rejeitos para descarte, preparação de polpas com densidades mais adequadas para operações subsequentes (filtragem, moagem, flotação, lixiviação, preenchimento de cavidades) e separação das espécies dissolvidas dos resíduos lixiviados.

Esse processo de separação ocorre pelo princípio da ação da gravidade, o que torna um processo simples, barato e com elevada capacidade de processamento, possibilitando até mesmo o adensamento de polpa bastante diluídas, cerca de 1% de sólidos.

Com relação a aplicabilidade, os espessadores têm como produto de interesse o sólido e são caracterizados pela produção de material espessado com alta concentração de sólidos e uma água clarificada. Industrialmente os espessadores podem ser construídos em aço ou concreto armado, sendo os primeiros mais indicados para diâmetros menores, devido ao custo (CHAVES, 2004).

Os espessadores podem trabalhar em sistema de batelada ou contínuo, conforme WILLS e NAPIER MUNN (2006). O espessador contínuo consiste de um tanque cilíndrico, cujo diâmetro varia de 2 a 200 metros de diâmetro e profundidade variando de 1 a 7 metros de altura. A polpa é alimentada via um poço de alimentação,

denominado de *feedwell*, colocado até 1 metro abaixo da superfície visando causar mínima perturbação possível ao sistema, conforme Figura 3.24. Dentro do tanque, existem um ou mais “braços rotativos” dispostos radialmente, denominados *rakes*, cujo objetivo é conduzir o material sedimentado até a saída, pelo duto central. No processo, os sólidos sedimentados são escoados pelo duto central, o líquido já clarificado, transborda por um canal que possibilita o escoamento periférico.

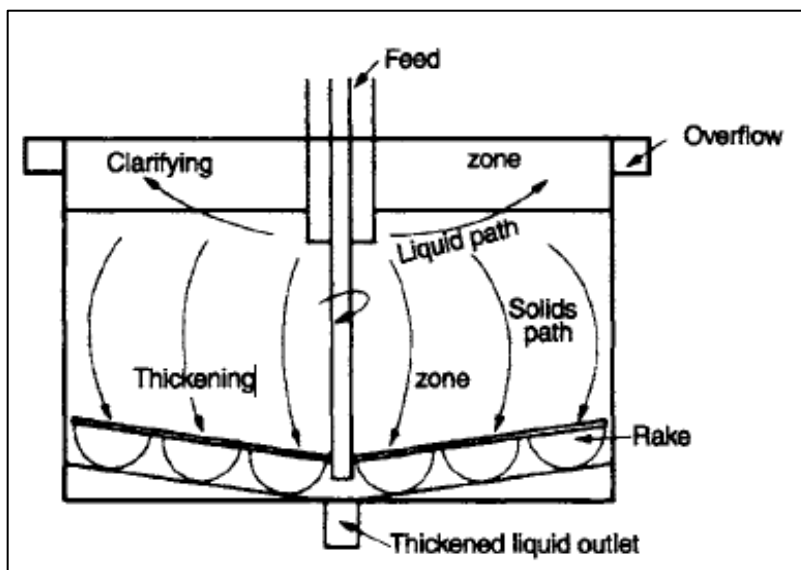


Figura 3.23 Fluxo de espessador contínuo (WILLS e NAPIER MUNN, 2006).

Tanto em operação contínua quanto nos ensaios em escala de bancada o regime de sedimentação é dividido em zonas, conforme ilustrado na Figura 3.25. Normalmente, ocorre a formação de quatro zonas distintas, tais como: clarificação, sedimentação, transição ou consolidação e compactação ou compressão.

**Zona A (clarificação):** região onde se encontra a camada de água já separada dos sólidos. Sua espessura mínima é normalmente de 0,61m, podendo chegar a 1,82m. Esta espessura é controlada com a adição de coagulante e/ou floculante;

**Zona B (sedimentação):** região onde ocorre o processo de sedimentação das partículas. Essa velocidade normalmente varia de 36m/s a 216m/s de acordo com a necessidade. Baixas velocidades provocam redução da camada de água na zona de clarificação, podendo transbordar sólidos pelo overflow. Por outro lado, velocidades muito elevadas podem provocar torque alto no sistema de acionamento do *rake*;

**Zona C (transição ou consolidação):** zona compreendida entre a zona de sedimentação e a zona de compactação. O tempo de transição normalmente é definido pela dosagem do coagulante e/ou floculante;

**Zona D (compactação ou compressão):** zona de maior concentração de sólidos. Nesta zona, a polpa é arrastada pelo rake para a região central do espessador e flui para a saída de *underflow*. A densidade, a espessura, a compactação e a fluidez dessa camada afeta o torque do espessador, por isso, um controle eficiente da dosagem de reagentes e concentração de sólidos do *underflow* é fundamental para preservar esforço sobre o mecanismo de giro do rake.

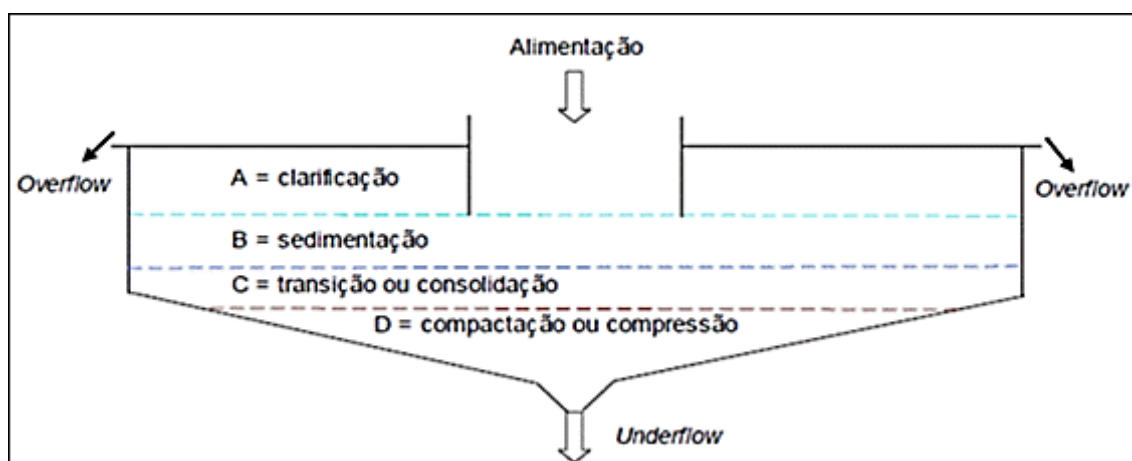


Figura 3.24 Fases da etapa de sedimentação em um espessador. (VALE, 2014).

Essas zonas podem ser melhor verificadas através dos testes de sedimentação por provetas, qual é baseado no deslocamento da interface superior da suspensão com o tempo, em que se observa essas quatro zonas coexistindo, e que ao longo do tempo, ficando somente material sedimentado e material clarificado. A Figura 3.26 corrobora com a elucidação anterior.

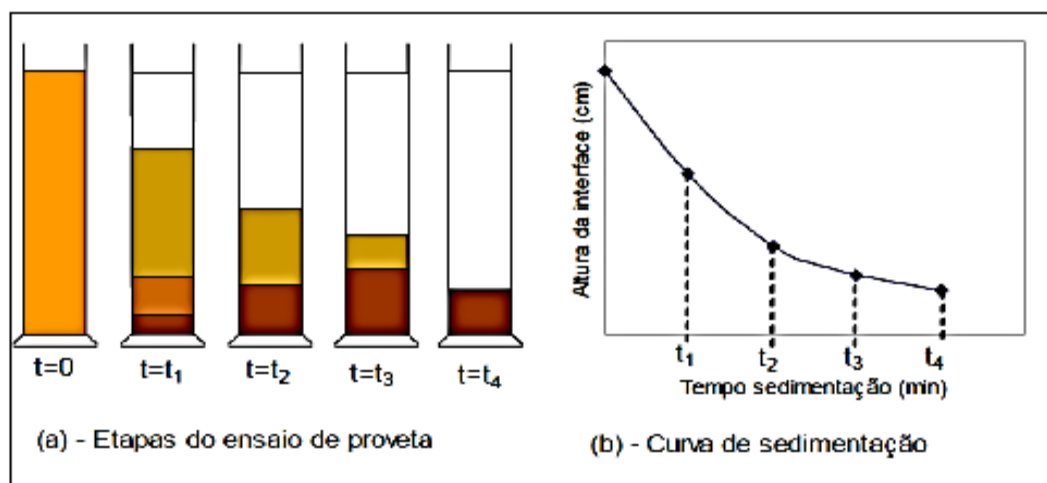


Figura 3.25 Fases de um ensaio de sedimentação e a respectiva curva. (VALE, 2014).

Durante processo de beneficiamento mineral, os espessadores são muito utilizados para obtenção de polpas com concentrações adequadas para um processo subsequente (espessadores de concentrado); para espessamento de rejeitos com concentração de sólidos elevada (espessadores de rejeito); para recuperação de água para reciclo industrial (espessadores de concentrado e rejeito) e recuperação de sólidos ou solução de operações de lixiviação, utilizados em processos hidrometalúrgicos, ou seja, sempre obtendo dois produtos distintos a partir da técnica de sedimentação.

### 3.2.3.2. Filtragem

Conforme WILLS (2006), a filtragem é o processo de separação de sólidos a partir de líquido através de um meio poroso que retém o sólido, mas permite que o líquido passe. As condições sob as quais a filtragem é realizada são muitas e variadas e a escolha do tipo adequado de equipamento vai depender de um grande número de fatores. Independentemente do tipo de equipamento usado, uma torta, gradualmente, se acumula sobre o meio filtrante e a resistência ao fluxo progressivamente aumenta durante toda a operação.

No que diz respeito as condicionantes para esse processo, vale salientar algumas variáveis cruciais ao processo, tais como pressão de vácuo (filtros a vácuo), área de superfície de filtragem, taxa de filtragem, viscosidade do filtrado, a resistência da torta, temperatura da polpa, concentração de sólidos, distribuição granulométrica, pH da polpa, presença de lamas. Dentre essas, GUIMARÃES (2011) destaca algumas:

- a) A taxa de filtragem cresce com a redução do ciclo de filtragem, porém pode acarretar o aumento da umidade da torta, ou a obtenção de tortas extremamente finas que poderão prejudicar a descarga;
- b) O aumento da temperatura da polpa favorece a filtragem uma vez que ocorre uma redução da viscosidade do filtrado. Porém essa operação é excessivamente dispendiosa e assim não é usual em operações industriais;
- c) Polpas com concentração de sólidos mais elevada favorecem a filtragem. A maioria dos filtros requer uma concentração de sólidos mínima na sua alimentação para garantir o seu desempenho (principalmente os filtros que operam a vácuo). Por isto é usual o adensamento da polpa por espessadores, ciclones ou outro equipamento antes da filtragem;
- d) Partículas de distribuição granulométrica grossa formam tortas com interstícios maiores;
- e) As lamas apresentam efeito negativo na filtragem uma vez que elas tendem a “cegar” o meio filtrante. Desta forma, com o objetivo de reduzir o efeito das lamas e aumentar a taxa de filtragem, algumas vezes são adicionados floculantes nos tanques.

De acordo com FRANÇA (2010), o processo de filtragem pode ser representado conforme Figura 3.27, em que a suspensão escoar por ação da pressão contra o meio filtrante, resultando na separação entre o filtrado e a torta, a maior parte do líquido da suspensão constitui o filtrado e as partículas sólidas formam uma torta saturada com o líquido.

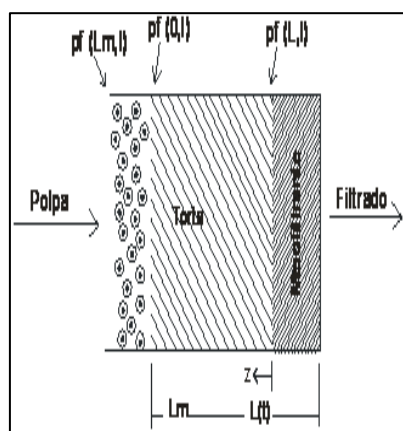


Figura 3.26 Esquematização de filtragem com formação de torta. (FRANÇA, 2010).

Dessa forma, pode-se afirmar que a teoria de filtragem é baseada em alguns pontos fundamentais, tais como a capacidade do filtrado de escoar entre a torta e meio filtrante, a torta crescer de forma contínua ao longo do processo. Vale ressaltar que a espessura da torta é uma variável que reflete a eficiência do processo de filtragem, e estando extremamente relacionada com tempo de filtragem, características do elemento filtrante e da polpa em suspensão.

Notadamente, devido a inúmeros estudos na área, diversos equipamentos foram desenvolvidos, sendo mais comumente usados em escala industrial a filtragem a disco. O princípio que norteia a filtragem a disco está relacionado com a diferença de pressão existente entre a polpa e a superfície do meio filtrante, sendo instituída por meio de um sistema de vácuo, o qual permite a passagem do líquido através do elemento filtrante, enquanto as partículas sólidas são retidas nesse meio, formando a torta de filtragem.

Conforme VALADÃO e ARAUJO (2007), o filtro de disco é composto por uma série de discos espaçados, ligados entre si por um tubo que executa um movimento de rotação. A formação de torta é realizada em ambos os lados de cada disco, dentro de uma bacia de polpa mantida sob agitação, a descarga da torta é feita com auxílio de ar comprimido. Normalmente, a pressão média de trabalho é entre 450mmHg a 500mmHg e a torta formada possui uma espessura fina, máximo de 1cm. A Figura 3.28 ilustra bem o funcionamento do filtro a disco.

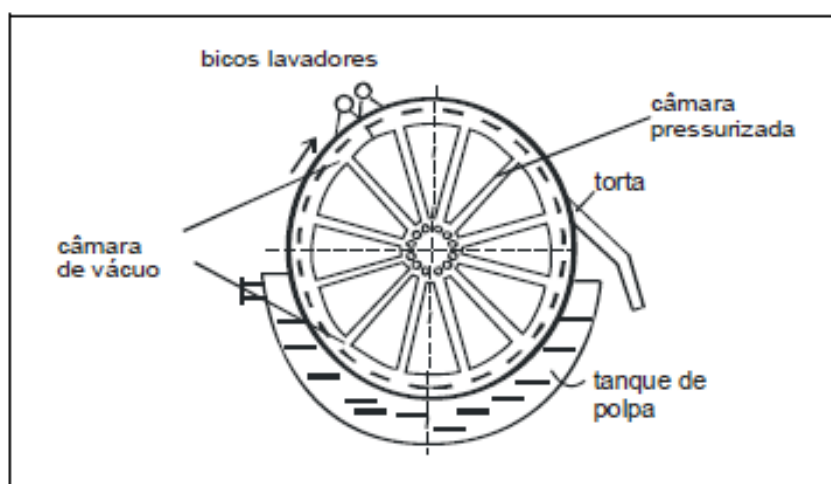


Figura 3. 27 Operação do filtro rotativo a vácuo. (FRANÇA, 2010).

Os filtros a vácuo são compostos por setores (seções perfuradas de metal por onde o líquido flui) recobertos com os elementos filtrantes, sob o qual os sólidos são depositados para formar a torta. A coleta do filtrado é feita nos compartimentos receptores de vácuo e as bombas de vácuo podem ser montadas ao lado do filtro ou em outro compartimento.

### 3.3. Mina de Gongo Soco

A mina de Gongo Soco, pertencente ao complexo Minas Centrais, da Vale, (que conta ainda com as minas de Brucutu e Água Limpa), é uma das minas mais antigas da região. De acordo com IPHAM, Gongo Soco presenciou o auge e a decadência da exploração do ouro de aluvião e da mecanização rudimentar da atividade mineradora. No século XIX, viveu seu apogeu, com a mineração aurífera subterrânea, mecanizada e industrializada. Com o declínio do rico mineral, a extração do ouro foi substituída pela do ferro, atividade ainda existente na região de Barão de Cocais.

#### 3.3.1. Instalação de Beneficiamento

Gongo Soco chegou a possuir três instalações de beneficiamento, denominadas de ITMI, ITM II e ITMIII, sendo que apenas a ITMI e ITMIII foram geradoras de rejeito.

A instalação ITMI possuía a seguinte rota de beneficiamento:

O *Run of Mine* (minério hematítico) era transportado por caminhões e descarregado na praça para formação das pilhas, de onde era retomado por pá carregadeira e alimentava um britador primário de mandíbulas. O *undersize* da grelha junto com o produto do britador primário era transportado por correias transportadoras para o peneiramento primário, cujo *oversize* era direcionado para um britador secundário. O produto deste britador retornava para o peneiramento primário, fechando o circuito e o *undersize* era transportado por correias para o peneiramento secundário a úmido.

No peneiramento secundário, o minério era alimentado em três linhas de peneiramento. Cada linha era composta por uma peneira tipo banana e uma peneira horizontal de dois decks com malhas de 19mm e 8mm. O *oversize* do 1° deck das



peneiras horizontais (-37+19mm) gerava o produto Natural Pellet Ore (NPO) e o *oversize* do segundo deck (-19+8mm) gerava o produto denominado hematitinha (HEM).

O *undersize* das peneiras (-8mm) alimentava dois classificadores espirais, em paralelo, com corte em 0,15mm, o *underflow* (-8 +0,15mm) gerava o produto *sinter feed* (SFC), o qual era desaguado por quatro peneiras desaguadoras. O *overflow* dos classificadores (- 0,15mm) era bombeado para a ciclonagem primária; o *overflow* da primária era direcionado para a ciclonagem secundária, sendo que o *overflow* dessa etapa seguia para o espessador de lamas. O *underflow* das ciclonagens primária e secundária era direcionado para um tanque pulmão de onde era bombeado para a filtragem, produzindo o *Pellet Feed* (PFF). Nesse período, o rejeito continha teor de ferro igual a 53,8%. Abaixo, fluxograma da ITMI, figura 3.29.

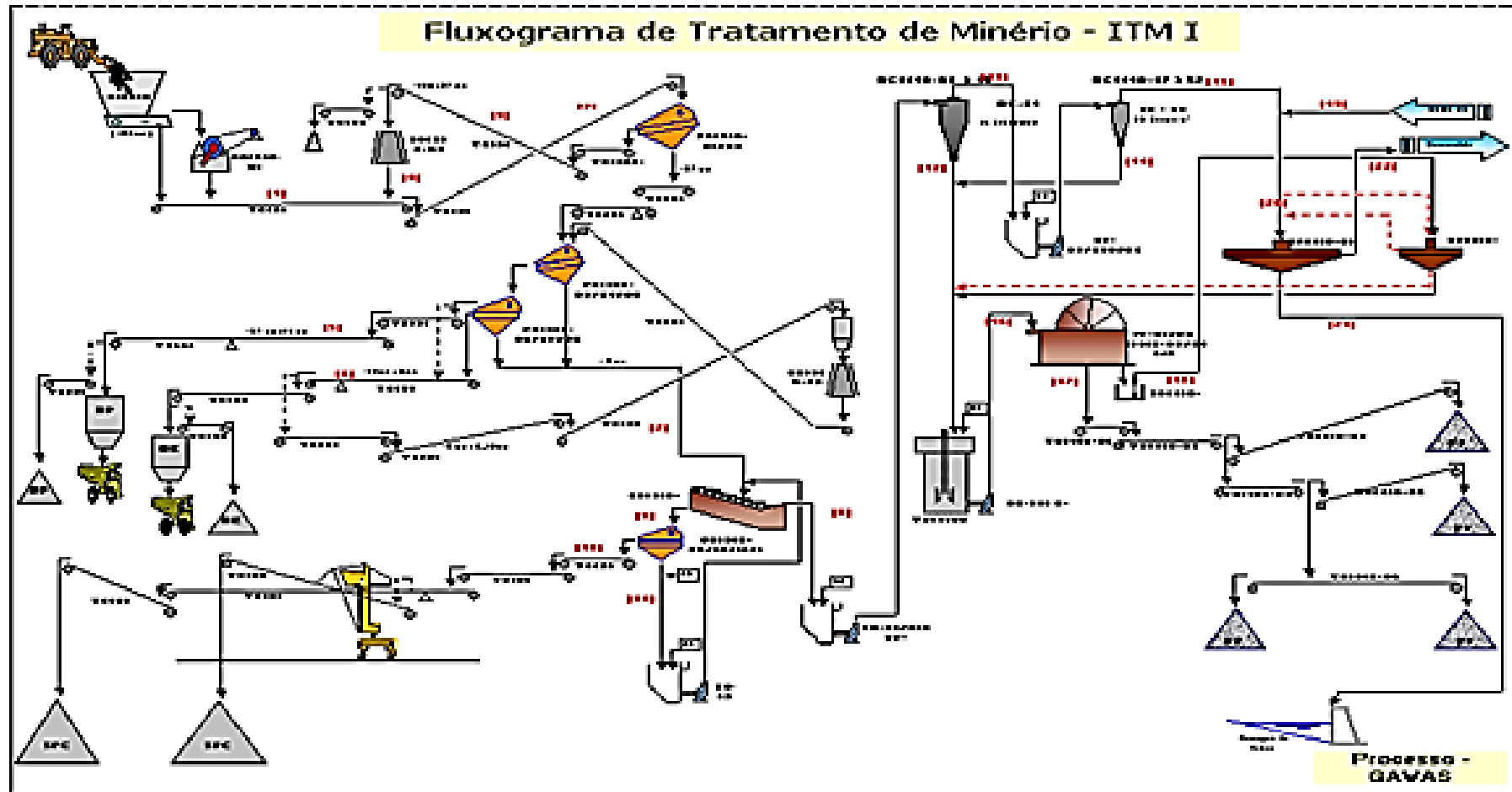


Figura 3.28 Fluxograma ITMI – Mina de Gongo Soco. (VALE, 2008).

A instalação ITMIII possuía a seguinte rota de beneficiamento:

O *Run of Mine* (minério itabirítico) era transportado por caminhões e descarregado na praça para formação das pilhas, de onde era retomado por pá carregadeira e alimentava uma moega dotada de um alimentador vibratório que alimentava uma grelha. O *oversize* da grelha era enviado para uma pilha de estocagem de granulados que posteriormente seria recuperada por pá carregadeira e através de caminhões descartado na pilha de estéril.

O *undersize* da grelha alimentava uma peneira primária, sendo o *oversize* de seu 1º deck (+ 50mm) estocado na pilha de granulado para posterior descarte junto ao estéril, já o *oversize* do 2º deck (-50 + 9mm) alimentava um britador terciário e o produto deste britador retornava para a peneira primária fechando o circuito.

O *undersize* da peneira alimentava dois silos existentes no prédio da concentração gravimétrica. Dos silos, o minério era retomado via alimentadores de correia que alimentavam duas peneiras vibratórias com malhas de 1mm. O *oversize* dessas peneiras alimentava os jigues, sendo o seu rejeito, após desaguado na peneira era transportado para o silo de estocagem. Desse silo, o rejeito era descarregado em caminhões e transportados para o depósito. O concentrado dos jigues ia para as peneiras desaguadoras, sendo o *oversize* parte do produto final, o qual era empilhado no pátio de produtos.

O *undersize* das peneiras (-1mm), juntamente com o *undersize* da peneira desaguadora, alimentavam os hidrociclones. O *overflow* desses hidrociclones alimentava os hidrociclones deslamadores, sendo o seu *overflow* encaminhado ao espessador de lamas para recuperação de água e o seu *underflow* encaminhado para a barragem de rejeitos.

O *underflow* dos hidrociclones era direcionado para um tanque pulmão que alimentava as espirais concentradoras. O concentrado dessas espirais alimentava os hidrociclones desaguadores, sendo o seu *overflow* recirculado para os jigues, e o seu *underflow* encaminhado para as peneiras desaguadoras, incorporando ao produto final.

O rejeito das espirais concentradoras ia juntamente com o *overflow* dos hidrociclones para os hidrociclones deslamadores, para recuperação de água e

descarte dos sólidos na barragem de rejeito. Nesse período, o rejeito total continha teor de ferro menor a 30%. Na Figura 3.30, pode-se observar o processo descrito anteriormente.

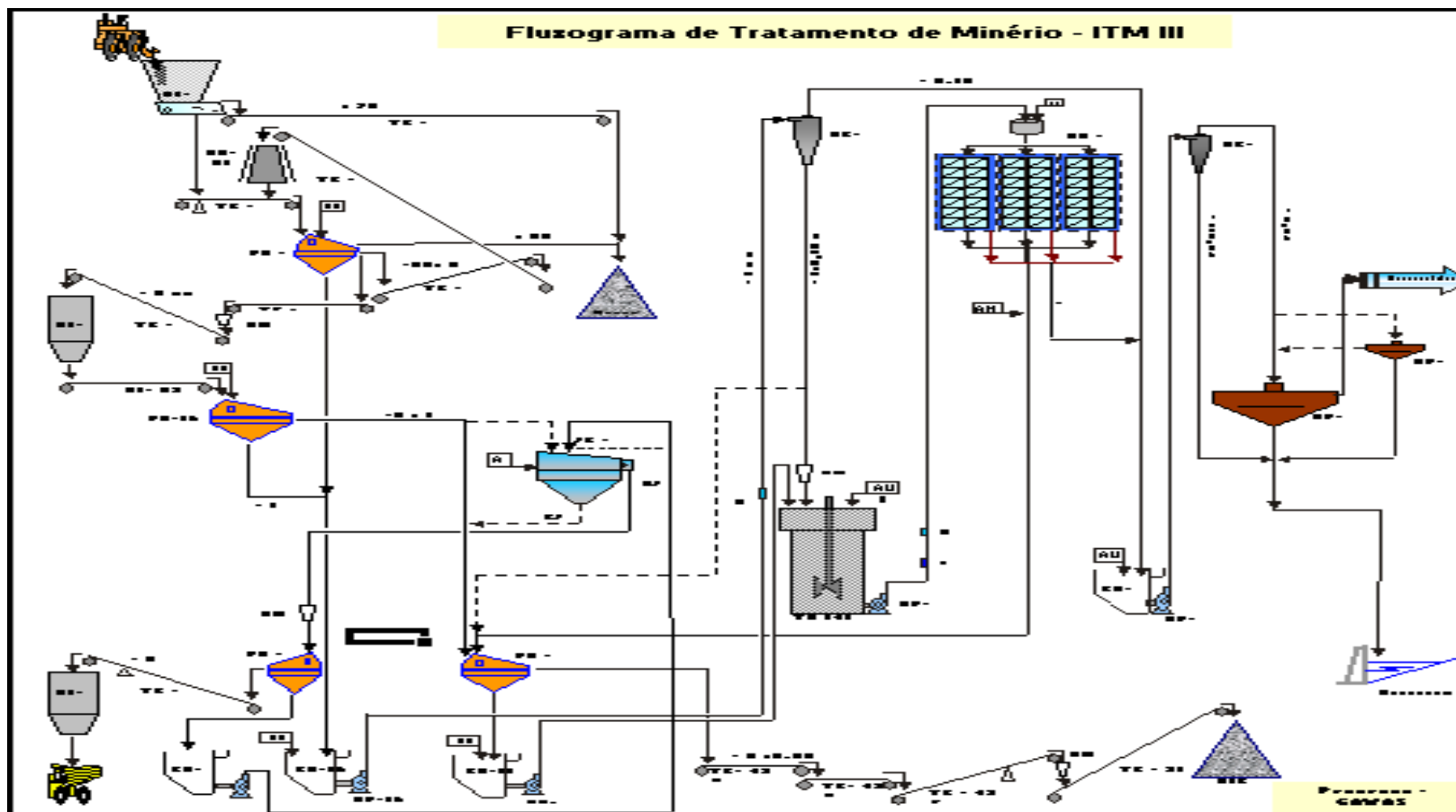


Figura 3.29 Fluxograma ITMIII – Mina de Gongo Soco. (VALE, 2008).

### 3.3.2. Barragem de Rejeito – Barragem Sul Superior

As atividades da Mina de Gongo Soco tiveram início em 1994, quando entrou em operação a Instalação de Tratamento de Minério I (ITM I) e o ROM alimentado era somente hematita.

Em 1997 foi montada a concentração de itabiritos, contemplando um circuito de jigagem para a fração  $-8 +1\text{mm}$  e um circuito de espirais concentradoras para a fração  $-1 +0,15\text{mm}$ , sendo a fração  $-0,15\text{mm}$  toda descartada para barragem, pois o seu teor era menor que 30% de ferro. Desde então, havia uma programação para operar 90% do tempo com hematita e 10% com itabirito.

Sendo assim, durante a operação dessas instalações, foram depositados cerca de 10Mta, com teor médio de ferro de 52%. A Figura 3.31 ilustra a barragem Sul Superior, instalada na Mina de Gongo Soco.



Figura 3.30 Foto aérea da barragem Sul Superior, Mina Gongo Soco. (VALE, 2008).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada nesse estudo constou de três etapas: amostragem, caracterização das amostras e testes em bancada (concentração e separação sólido-líquido).

### 4.1. Amostragem

Durante a etapa de amostragem, massas suficientes para a etapa de caracterização foram coletadas em pontos distintos, conforme a deposição do rejeito ao longo da barragem Sul Superior, Mina de Gongo Soco. Em seguida, as amostras foram encaminhadas à caracterização mineralógica e tecnológica, tais como análise granulométrica, análise química quantitativa, identificação e quantificação mineralógica das amostras. Após a etapa de caracterização, foi executada a etapa de testes de concentração e separação sólido-líquido com um grupo de amostras, testes estes que foram embasados a partir dos resultados da caracterização.

A Figura 4.1 apresenta um diagrama resumido de todas as atividades realizadas ao longo do trabalho.

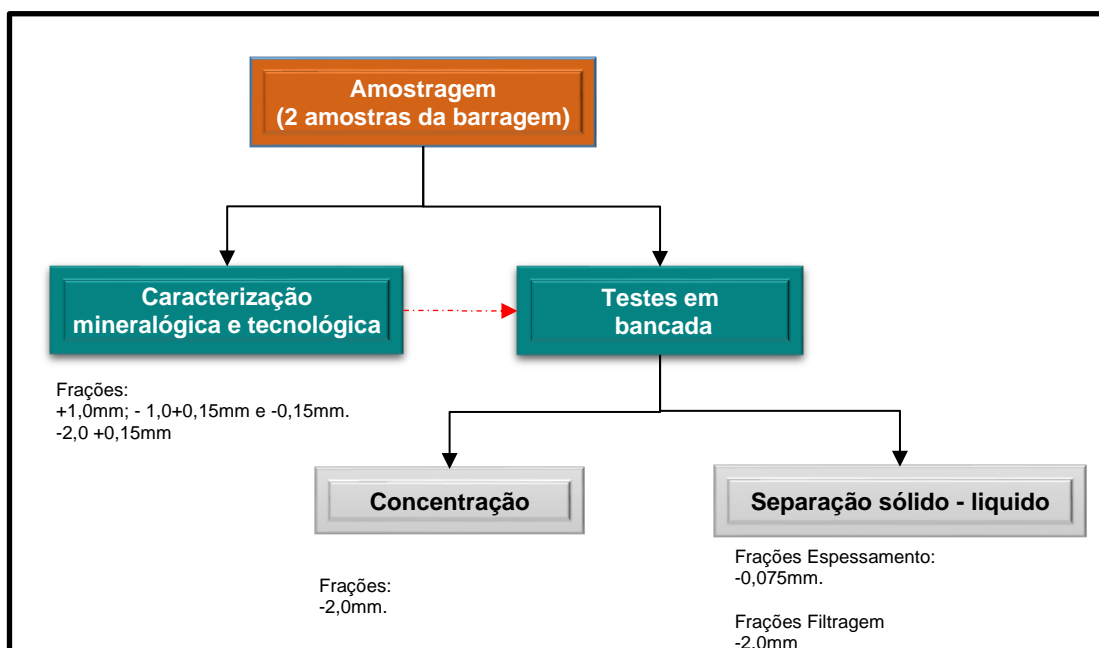


Figura 4.1 Fluxograma resumido do método da pesquisa. (Próprio Autor, 2016)

Para o trabalho em questão foram realizadas duas amostragens na barragem Sul Superior, distribuídas assim em 2 grupos distintos. O primeiro grupo foi composto por amostras de menor massa (denominado de G1), voltadas principalmente para o estudo de caracterização mineralógica/tecnológica, e um outro grupo formado por amostras de maior massa (denominado de G2), uma vez que, além de ensaios de caracterização, estas amostras foram usadas principalmente nos ensaios de concentração e separação sólido-líquido. A Figura 4.2 mostra os pontos definidos para a coleta dos dois grupos de amostras na barragem.

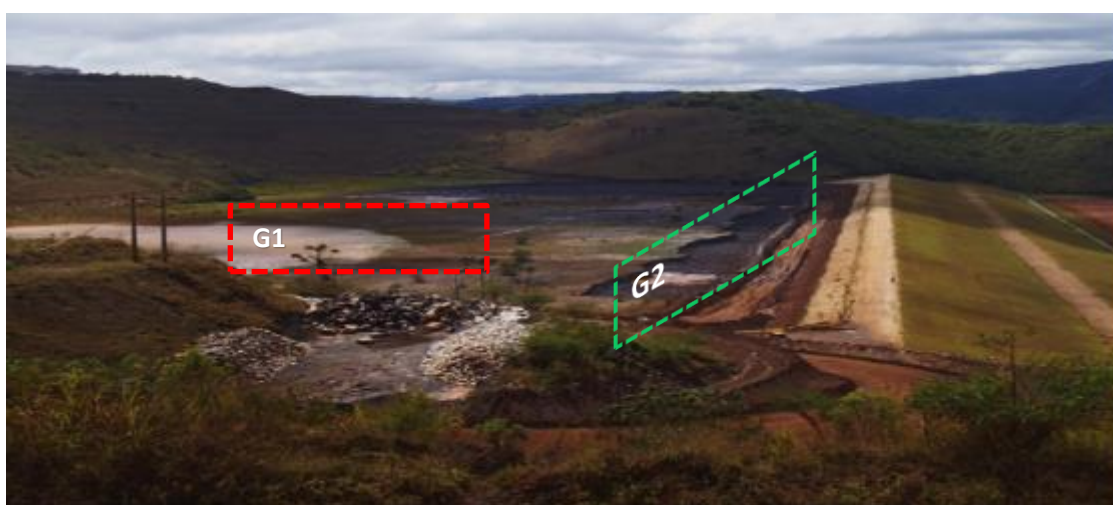


Figura 4.2 Áreas de coleta das amostras de barragem. (VALE, 2016).

Após a coleta, as amostras foram enviadas ao CPT (Centro de Pesquisa Tecnológica de Ferrosos – Mariana, MG) a fim de dar início ao processo de preparação e etapas subsequentes da pesquisa. No CPT, inicialmente as amostras foram homogeneizadas e quarteadas em frações conforme aplicabilidade da caracterização e testes de bancada.

#### **4.2. Caracterização química-granulométrica-mineralógica-microestrutural**

Toda a etapa de caracterização foi realizada na VALE, no Centro de Pesquisa Tecnológicas de Ferrosos, CPT, na unidade instalada na Mina de Alegria, em Mariana - MG.



Como mencionado anteriormente, as amostras que compuseram o grupo G1 foram usadas basicamente para o estudo de caracterização químico-mineralógica-microestrutural. Para tal, essas amostras foram devidamente preparadas em laboratório, para em seguida, realização de análises de granulometria em peneiras e por difração de laser.

Vale ressaltar que, para as amostras deste grupo, além da microscopia de luz refletida, durante a etapa de quantificação da composição mineralógica, foram realizadas análises por difratometria de raios-X e QEMSCAN, a fim de se obter maior conhecimento da composição mineralógica, microestrutural e de liberação das mesmas, de forma a contribuir para a definição da melhor rota de processo.

Com relação às amostras que constituíram o grupo G2, após a preparação das mesmas em laboratório, também foi retirada uma alíquota para realização de granulometria em peneiras e por difração de laser. Além disso, a massa restante foi classificada em 2,0mm (simulando o peneiramento de proteção granulométrica para a etapa de concentração magnética). A fração +2,0mm foi analisada quimicamente e posteriormente arquivada. Com a fração -2,0mm foi realizado análise química e então destinada a ensaios de concentração, o concentrado dessa etapa ao processo de separação sólido-líquido (teste de filtragem – *leaf test*) e a fração -0,075mm do rejeito, oriunda do processo, a ensaios de separação sólido-líquido (sedimentação).

Para a análise mineralógica deste grupo, foi designada a fração -2,0 mm, com o objetivo de subsidiar os testes de concentração magnética. Para a análise química foram aplicados os métodos de espectrometria de fluorescência de raios-X e gravimetria tradicional. A quantificação da composição mineralógica dessas amostras foi somente realizada por meio de microscopia de luz refletida, uma vez que, assim como no trabalho realizado por SANTOS e BRANDÃO (2005), as análises qualitativas por microscopia de luz refletida foram realizadas a fim de avaliar as características morfológicas e texturais das partículas presentes na amostra.

Nesse trabalho, a interpretação esteve voltada para a concentração magnética com estimativa de recuperação mássica e teor de  $\text{SiO}_2$  no concentrado. Vale salientar ainda que não foi considerada a hipótese de realizar testes de concentração por flotação, devido a relação custo-benefício não ser viável, pois o volume de rejeito

existente na Barragem Sul Superior é baixo, tendo em vista o CAPEX/OPEX necessário para a implantação de uma instalação de flotação, inviabilizando assim o estudo dessa possível rota de processo.

Além do fator econômico, há também condicionantes geotécnicos da barragem, que não possibilita a lavra em regiões cujo percentual da fração  $-0,15\text{mm}$  é maior, o que requer estudos geotécnicos para definir a melhor maneira de ser retirado o rejeito de tal forma a garantir a estabilidade da barragem, assim como avaliar a estabilidade da pilha Sudeste com o rebaixamento do nível de água no reservatório da barragem. Além disso, conforme relatório emitido pela equipe de geotecnia, a remoção do rejeito não poderá ser feita de forma rápida para se evitar os riscos de liquefação (rejeitos de hematita) dos rejeitos colocando em riscos a estrutura da barragem.

A Figura 4.3 representa o fluxograma simplificado proposto para a caracterização das amostras G1 e G2.

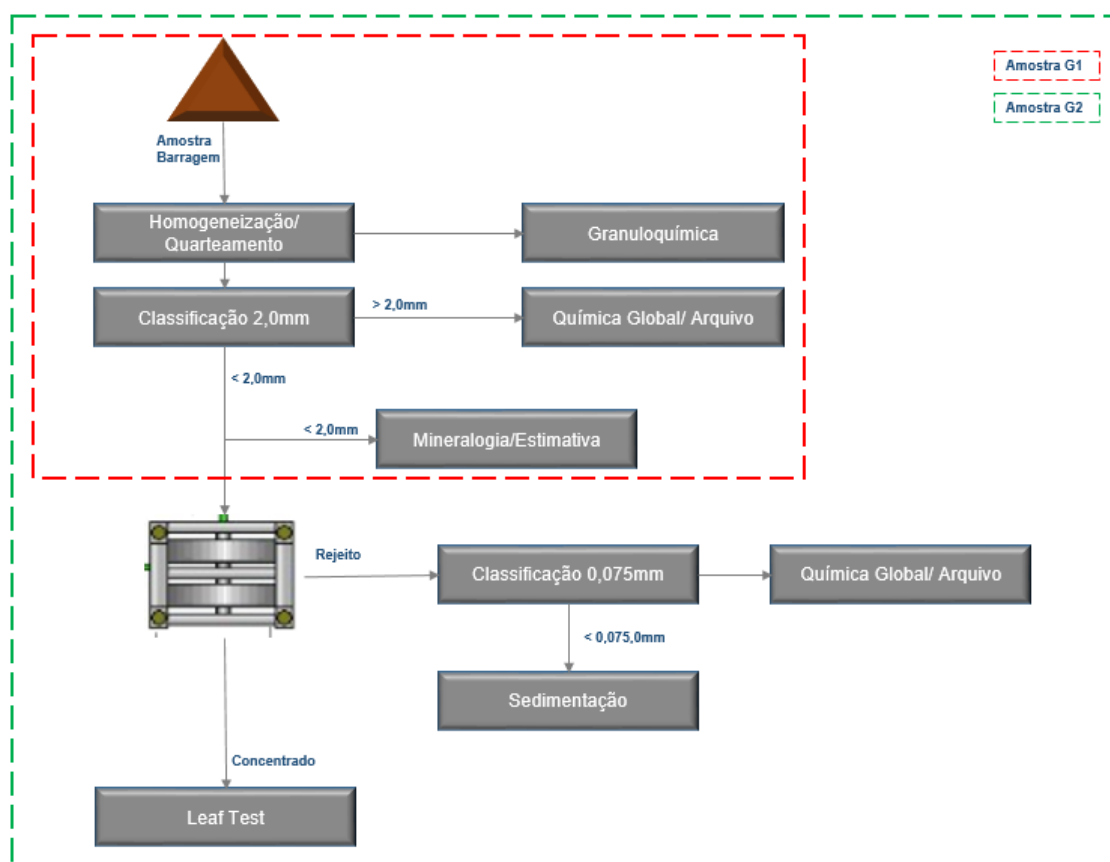


Figura 4.3 Fluxograma simplificado para caracterização das amostras (VALE, 2014).

As análises física, química e mineralógica foram fundamentais para estudos subsequentes, relacionados à definição da rota de processo.

#### 4.2.1. Análise Granulométrica

Como mencionado anteriormente, a análise granulométrica foi realizada via instrumental. O material a ser analisado, primeiramente passou pelo processo de quarteamento, foi seco em estufa e posteriormente, passou por uma série de peneiras vibratórias até a fração 0,045mm (325#), a fim de avaliar a distribuição das partículas.

Para a análise das partículas abaixo de 0,045mm foi utilizado o granulômetro a laser (CILAS modelo 920), de propriedade do CPT de Ferrosos.

Com essa fração, uma polpa foi preparada em recipiente com aletas e colocada em agitação no agitador eletromecânico. Após esse processo, uma alíquota da polpa foi então retirada com a quantidade necessária, através de uma seringa. Toda amostra contida na seringa foi inserida dentro do porta-amostra do equipamento e a análise granulométrica assim foi obtida.

#### 4.2.2 Análise Química

As análises químicas foram realizadas no laboratório químico da unidade de Alegria, pelo método de fluorescência de raios-X, sendo analisados os seguintes elementos: Fe, SiO<sub>2</sub>, P, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn, TiO<sub>2</sub>, CaO, MgO. Para a análise de química global e de cada faixa granulométrica foi utilizado o espectrômetro de raios-X da marca *Rigaku*, modelo *Simultix 12*, utilizando-se o método da pastilha fundida.

Já o valor de PPC foi obtido via método de gravimetria tradicional. Vale salientar que o mesmo pode ser negativo quando o material apresenta compostos não totalmente oxidados e há ganho de massa (oxigênio) durante a calcinação.

#### *4.2.3 Análise por Microscopia de Luz Refletida*

A metodologia aplicada na quantificação da composição mineralógica foi feita por microscopia de luz refletida, sendo utilizados microscópios petrográficos Leica, modelos DMLP, DM2500P e DM6000M (com analisador de imagens). Conforme metodologia aplicada por GONÇALVES (2015), a estimativa foi realizada pela quantificação de cada campo visual (considerando cada campo como 100% em área), em seguida, convertendo-se em 100% da seção polida.

Neste estudo foi avaliada apenas a microscopia de luz refletida, utilizada para identificar minerais opacos, como os óxidos e hidróxidos de ferro, que compõem os minerais de interesse do estudo. Para o cálculo da composição química através da quantificação mineralógica, foi utilizada a média da composição química de cada espécie mineral.

A validação das quantificações mineralógicas foi efetivada através da comparação entre os resultados da análise química obtida em laboratório (via espectrometria de fluorescência de raios-X) e a composição química determinada através de cálculos realizados a partir da quantificação mineralógica, considerando o percentual de cada composto químico como média do intervalo aceitável de cada mineral. Para obtenção de fotomicrografias foi usada a câmera componente do analisador de imagens conectado ao software QWin (LEICA).

#### *4.2.4 Análise por Difractometria de Raios-X*

Para as análises via difratometria de raios-X, foi adotado o método do pó. Dessa forma, as amostras foram pulverizadas abaixo de 0,045mm, logo após, as mesmas foram prensadas e analisadas no difratômetro de raios-X da PANalytical (modelo *Empyrean*) usando tubo de cobalto. As fases cristalinas foram identificadas e interpretadas pelo software TOPAS.

#### *4.2.5 Análise por QEMSCAN*

As amostras para o QEMSCAN foram preparadas no Centro de Desenvolvimento Mineral (CDM) localizado em Santa Luzia, Minas Gerais, sendo que a

metodologia aplicada para a análise via QEMSCAN foi baseada no trabalho de GONÇALVES, 2015. Dessa forma, primeiramente, as amostras foram embutidas em resina epóxi e polidas em politriz manual; em seguida, estas amostras foram recobertas com camada de carbono, para torná-las condutoras quando forem incididas pelos feixes de elétrons.

Para a caracterização mineralógica, via sistema QEMSCAN, foi utilizado o software *iMeasure* para as medições e os dados foram tratados a partir do software *iExplorer*, e foi aplicado o modelo de análise PMA (*Particle Mineral Analysis*).

Após o tratamento de dados, foram obtidas informações tais como quantificação mineralógica modal, análise de liberação, associações minerais e imagens digitais das composições minerais diferenciadas por cor.

### **4.3. Testes de processo**

Juntamente com a realização da caracterização mineralógica e tecnológica, foram realizados testes voltados para a etapa de concentração e separação sólido-líquido (filtragem e sedimentação) com as amostras pertencentes ao grupo G2, testes esses que foram fundamentados pelas análises de microscopia de luz refletida. A seguir, faz-se a descrição dos testes que foram realizados em escala de bancada.

Estes ensaios tecnológicos foram realizados na VALE, no Centro de Pesquisa Tecnológicas de Ferrosos, CPT, na unidade instalada na Mina de Alegria, em Mariana – MG.

#### **4.3.1 Teste em Bancada – Concentração Magnética**

Os testes foram realizados com a fração -2,0mm em concentrador eletromagnético Micromag (GAUSTEC), o qual é um concentrador de carrossel via úmido de alta intensidade de campo magnético (máximo de 18000 Gauss com gap de 2,5mm), conforme Figura 4.4. Em seu funcionamento, as partículas magnéticas são atraídas pelo campo eletromagnético e ficam aderidas às placas de imantação (constituindo o concentrado); as não magnéticas são descartadas por arraste hidráulico

e pela gravidade (constituindo o rejeito) e as partículas mistas são descartadas por ação entre forças competitivas (constituindo o médio).



Figura 4.4 Concentrador eletromagnético Micromag. (VALE, 2014).

Para a realização dos testes de bancada, foi adotada uma matriz rotativa de 4 rpm, gap de 2,5mm, um percentual de sólidos da polpa de alimentação em 40% e campo eletromagnético de 13000 Gauss.

#### 4.3.2 Teste em Bancada – Filtragem (Leaf Test)

Os testes de filtragem foram realizados com o concentrado magnético utilizando um conjunto constituído por *leaf* (elemento filtrante) conectado a um sistema de vácuo, segundo o método *top feed* (alimentação por cima), conforme Figura 4.5.

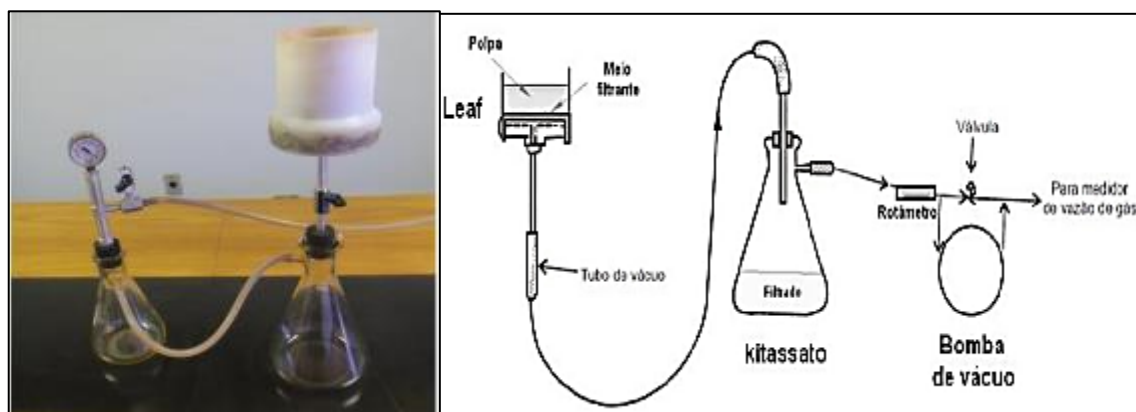


Figura 4.5 Da esquerda para a direita: Aparato para ensaios de leaf test; Montagem para realização dos ensaios top feed. (VALE, 2014).

Para esse trabalho, inicialmente foi realizado estudo explorando o desempenho de elemento filtrante (tecidos): Albany - 11363U e S12BR6-1. A polpa de alimentação foi preparada para 65% de sólidos em pH natural (aproximadamente 7,5). Para realização dos testes foi aplicada pressão de vácuo na ordem de 20 pol/Hg ou 508mm/Hg (valor calculado conforme a altitude do local onde se encontra a ITM III de Gongo Soco).

#### *4.3.3 Teste em Bancada – Sedimentação*

Os testes de sedimentação foram realizados com a fração -0,075mm do rejeito da concentração magnética, sendo efetuados em provetas de vidro de 1.000ml com o intuito de fornecer parâmetros à determinação da área unitária de espessamento ( $m^2/t/dia$ ).

Para execução dos ensaios de sedimentação em proveta, a polpa de alimentação foi preparada com 19% de sólidos (percentual máximo permitido para rejeito de minério de ferro) e pH de 7,5. O floculante utilizado nos testes foi o *Flonex 923 SH*, sendo exploradas três dosagens: 0g/t, 10g/t e 20g/t (parâmetros estes normalmente usados em testes industriais para sedimento de rejeito de minério de ferro em escala industrial).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são abordados os principais resultados das análises de caracterização e testes de bancada (concentração magnética e separação sólido-líquido) descritos no capítulo anterior. Para tal apresentação, os dados obtidos são divididos em dois tópicos básicos:

a) **Caracterização das amostras:** apresentam-se os resultados das análises realizadas com as duas amostras analisadas. Como comentado no capítulo anterior, as amostras do grupo G1, foram destinadas exclusivamente à caracterização químico-mineralógica-microestrutural. Quanto às amostras do grupo G2, de maior massa, foram destinadas tanto para os estudos de caracterização (menos completo que o realizado com as amostras do G1), como os testes em bancada (testes de concentração magnética e separação sólido-líquido). Dessa forma, nesse subcapítulo são apresentados os seguintes resultados das amostras avaliadas: **distribuição granulométrica, química global e por faixa, identificação das fases e quantificação mineralógica em microscopia ótica, difratometria de raios-X e QEMSCAN (sendo essas duas últimas somente para as amostras do grupo G1).**

b) **Testes de processo (ensaios em bancada):** são apresentados todos os resultados obtidos, bem como a estimativa de massa prevista nesse processo.

### 5.1. Caracterização químico-mineralógica-microestrutural

Conforme explanado nos capítulos 3 e 4 desta dissertação, os resultados da etapa de caracterização mineralógica auxiliaram na tomada de decisão quanto à definição da rota de processo. Este subcapítulo expõe os resultados mais relevantes encontrados nos ensaios de caracterização, comparando momentaneamente as amostras dos dois grupos amostrados na barragem (G1 e G2).



### 5.1.1 Análise Química

A partir dos resultados da análise química, observa-se que os grupos G1 e G2 apresentam resultados aproximados, principalmente para os teores de Fe e SiO<sub>2</sub>, sendo que as amostras do grupo G2 são relativamente mais ricas que as amostras do grupo G1. Com relação aos contaminantes, os teores de P mantiveram-se praticamente os mesmos nos dois grupos de amostras; os teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mostram-se elevados para as amostras do grupo G1 e mais baixos para o grupo G2; os teores de Mn e MgO também são elevados, provavelmente oriundos de minerais manganésíferos, mica ou talco. Em relação à granulometria, as amostras dos dois grupos apresentam para as frações avaliadas percentuais mássicos similares

A tabela V.1 apresenta a análise química global das amostras do grupo G1 e tabela V.2, a análise química global das amostras do grupo G2.

Tabela V.1 - Química natural – Amostras grupo G1 (CPT VALE, 2017).

GRUPO G1 (Amostras)	Fração	Massa	Análise Química								
	(mm)	(%)	Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	PPC
AM 1 - G1	Global	100,00	47,12	22,26	0,059	1,80	1,057	0,055	0,048	4,654	2,89
AM 2 - G1	Global	100,00	46,84	27,59	0,041	1,22	0,582	0,055	0,033	1,876	1,95
AM 2 - G1	Global	100,00	45,85	26,37	0,053	1,34	0,780	0,054	0,061	2,747	2,16
AM 2 - G1	Global	100,00	49,87	24,95	0,031	0,40	0,410	0,040	0,042	1,356	1,09

Tabela V.2 - Granuloquímica natural – Amostras grupo G2 (CPT VALE, 2017).

GRUPO G2 (Amostras)	Fração	Massa	Análise Química								
	(mm)	(%)	Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	PPC
AM 1 - G2	Global	100,00	51,14	23,47	0,028	0,37	0,386	0,046	0,070	1,413	0,88
AM 2 - G2	Global	100,00	51,73	22,48	0,028	0,39	0,383	0,046	0,070	1,402	0,87
AM 3 - G2	Global	100,00	52,12	21,44	0,027	0,37	0,386	0,046	0,071	1,379	0,84

### 5.1.2 Análise por Microscopia Luz Refletida

A tabela e gráficos a seguir apresentam a quantificação mineralógica estimada em massa da fração -0,150mm, em cada grupo de amostras.

Nas amostras do grupo G1, observa-se forte presença de minerais portadores de ferro (principalmente as hematitas compactas, nas variações lamelar, granular e especular), goethita terrosa e quartzo livre, conforme tabela V.3 e figura 5.1.

Tabela V.3 - Quantificação mineralógica grupo de amostras G1 (CPT – VALE, 2017).

GRUPO G1 (Amostras)	Quantificação Mineralógica (%)											
	Hematitas Compactas	Hematita Martítica	Magnetita	Goethita	Goethita Terrosa	Quartzo Livre	Quartzo Misto	Minerais de Manganês	Caulinita	Gibbsita	Mica	Outros Minerais
AM 1 - G1	61,06	0,00	0,00	0,68	10,29	22,82	0,06	0,39	0,00	0,75	0,00	3,94
AM 2 - G1	51,68	2,31	0,97	3,76	7,69	26,69	0,48	1,67	0,64	0,15	0,00	3,96
AM 3 - G1	54,58	0,00	0,00	1,40	11,63	26,26	0,91	1,71	0,00	0,74	0,00	2,77
AM 4 - G1	64,35	0,73	0,00	4,39	2,84	23,36	0,49	0,54	0,91	0,05	0,00	2,31

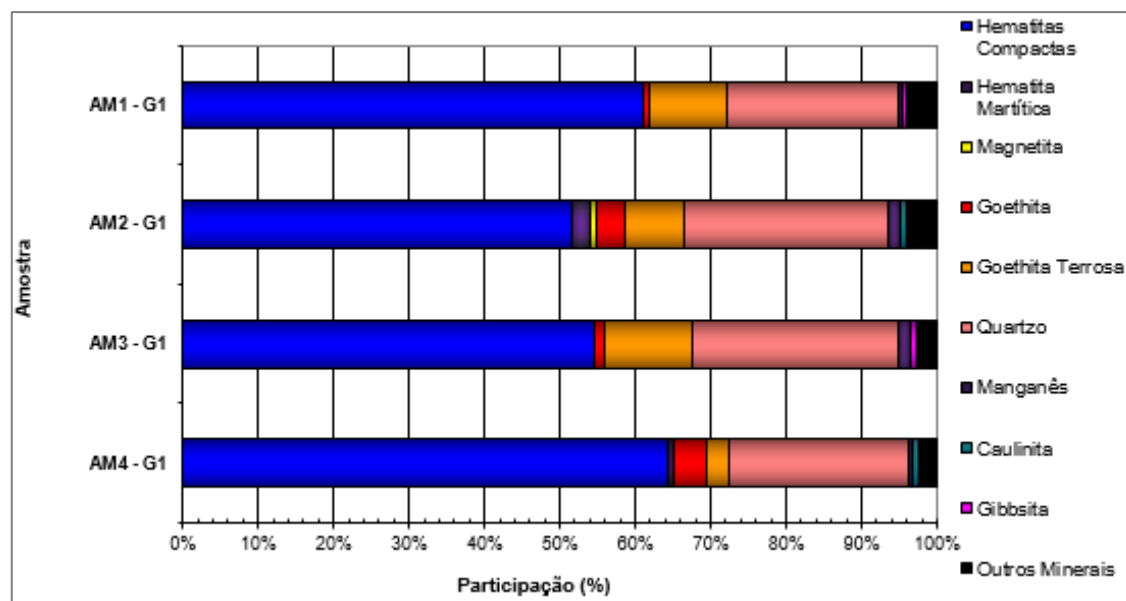


Figura 5.1 - Quantificação mineralógica grupo de amostras G1 (CPT – VALE, 2017).

Em relação aos minerais deletérios, as amostras AM2-G1 e AM3-G1 apresentam valores significativos para minerais de manganês, já a participação de gibbsita e caulinita é pequena nas três amostras. Quando analisados no microscópio de luz refletida, os minerais portadores de ferro apresentam cor cinza-esbranquiçada com nicóis paralelos, por vezes com tonalidade azulada com nicóis semicruzados. Para a diferenciação da hematita granular é necessário cruzar os nicóis para a distinção dos

cristais e geralmente apresentam-se com contatos retilíneos e junções tríplices. As hematitas especulares caracterizam-se pela relação entre comprimento e largura maior que 5:1 (inequidimensional), e para as hematitas lamelares esta relação é menor que 5:1, conforme figura 5.2.

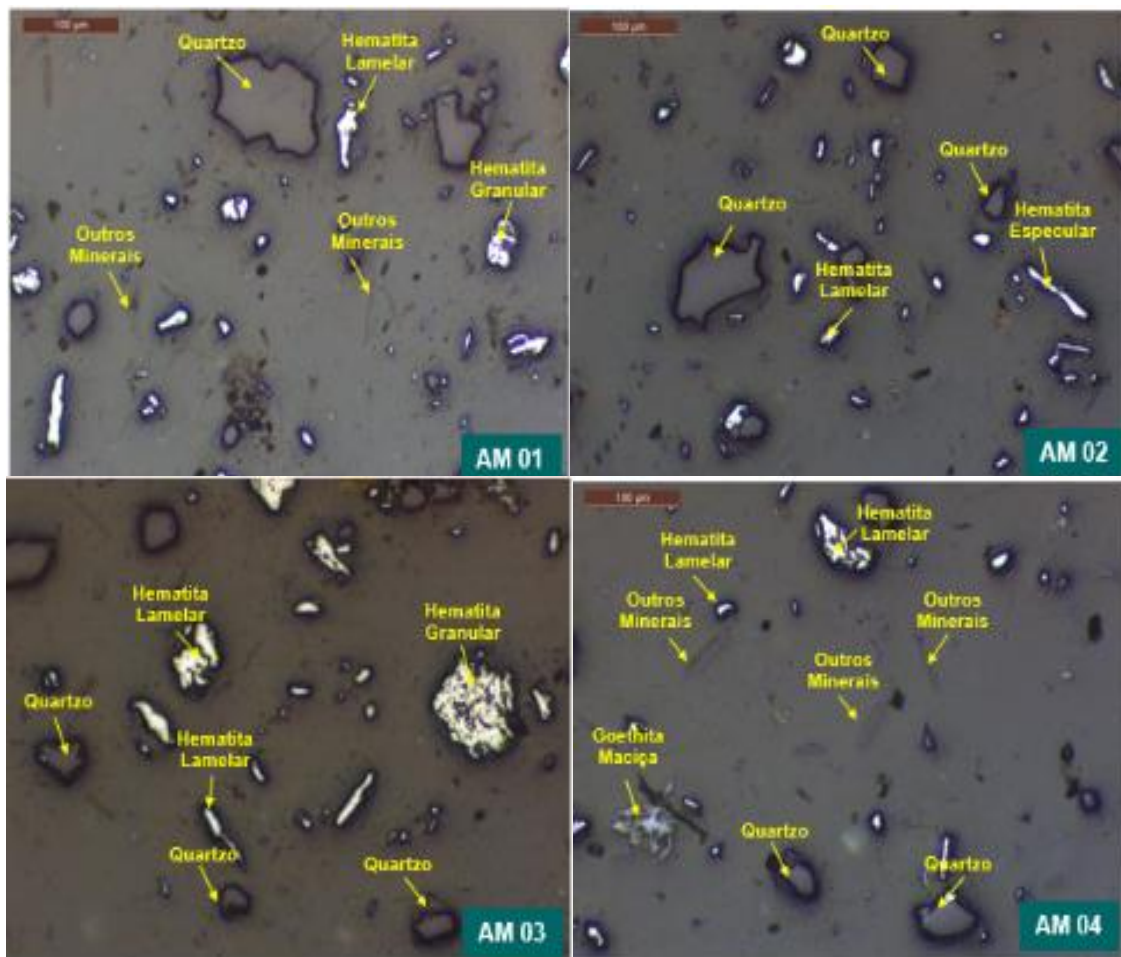


Figura 5.2 - Formas de Ocorrência da Hematita – Amostras G1 (CPT – VALE, 2017).

Estas amostras possuem certa hidratação com percentual de goethita (maciça e terrosa) acima de 7%. Conforme pode-se observar na figura 5.3, a goethita maciça aparece com cor cinza-azulada, por vezes mais escura, ocorrendo geralmente como produto de intemperismo de outros minerais de ferro, o que ocasiona quantidades variáveis de água em sua estrutura cristalina, assim como outros elementos ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , entre outros); já a goethita terrosa aparece ao microscópio de luz refletida com coloração variada, tais como marrom clara, amarelada, avermelhada, entre outras, caracterizando-se por possuir maior grau de hidratação comparada à goethita propriamente maciça e consistência terrosa, que é visualizada ao microscópio quando cruza-se os nicóis.



Figura 5.3 - Forma de ocorrência da goethita – Amostras G1 (CPT – VALE, 2017).

No que tange à presença de quartzo e contaminantes das amostras do grupo G1, a participação de quartzo é alta, ocorrendo geralmente livre de associações e caracteriza-se por possuir coloração cinza, bordas facilmente distinguíveis e é compacto. Os minerais de manganês estão presentes em todas as amostras, com aspecto terroso. Já a participação de caulinita e gibbsita são baixas nestas amostras, assim como a participação de magnetita e hematita martítica. A figura 5.4 evidencia estas afirmativas.

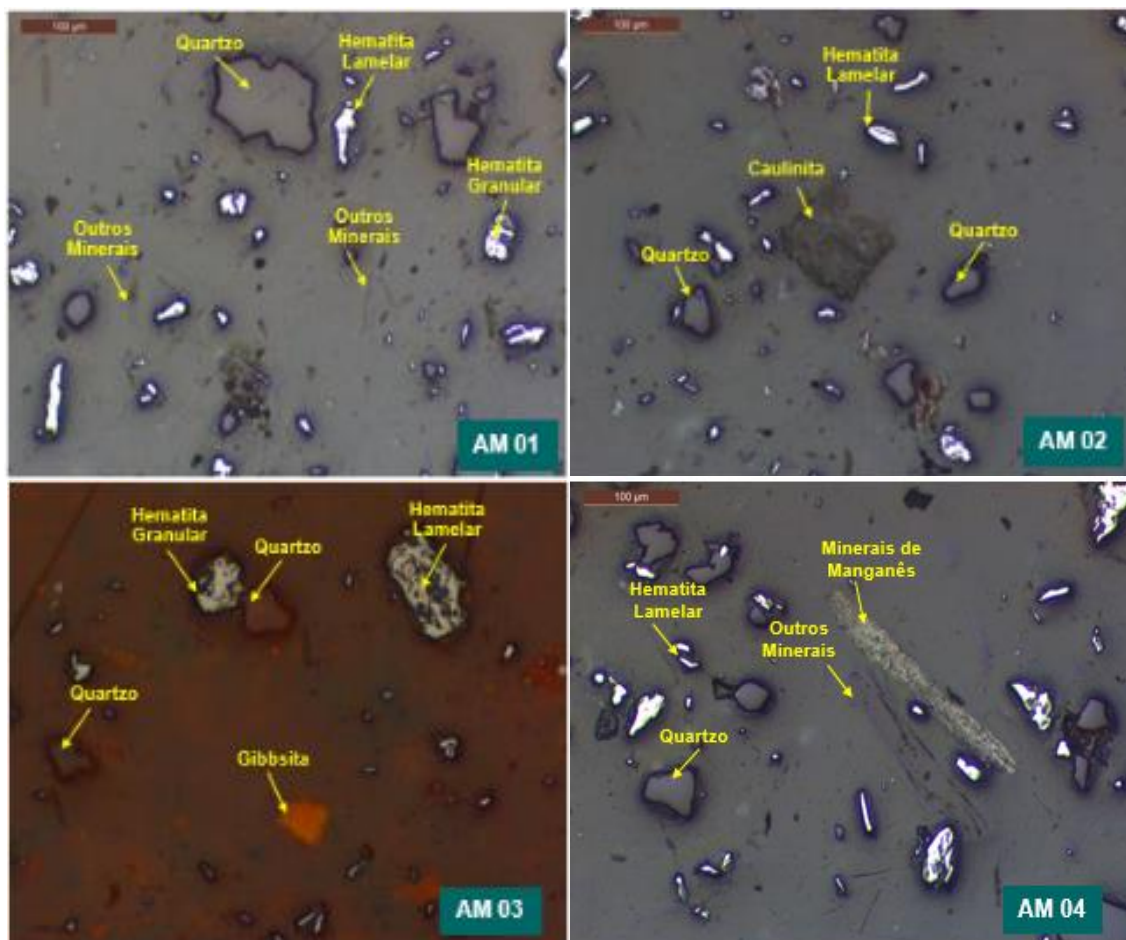


Figura 5.4 Formas de ocorrência de quartzo e contaminantes– Amostras G1 (CPT – VALE, 2017).

Nas amostras do grupo G2, também se observa forte presença de minerais portadores de ferro (principalmente as hematitas compactas, nas variações lamelar, granular e especular) e quartzo livre (sendo significativa a participação de quartzo na amostra AM3-G2), conforme tabela V.4 e figura 5.5.

Tabela V.4 -Quantificação mineralógica grupo de amostras G2 (CPT – VALE, 2016).

GRUPO G2 (Amostras)	Quantificação Mineralógica (%)											
	Hematitas Compactas	Hematita Martítica	Magnetita	Goethita	Goethita Terrosa	Quartzo Livre	Quartzo Misto	Minerais de Manganês	Caulinita	Gibbssita	Mica	Outros Minerais
AM 1 - G2	86,30	0,28	0,86	3,73	0,86	2,40	3,46	1,36	0,31	0,04	0,00	0,40
AM 2 - G2	83,26	1,00	0,72	5,73	0,55	4,88	2,37	0,78	0,00	0,21	0,02	0,49
AM 3 - G2	25,88	0,28	0,09	3,75	3,38	35,46	2,62	2,00	0,29	0,56	5,76	19,95

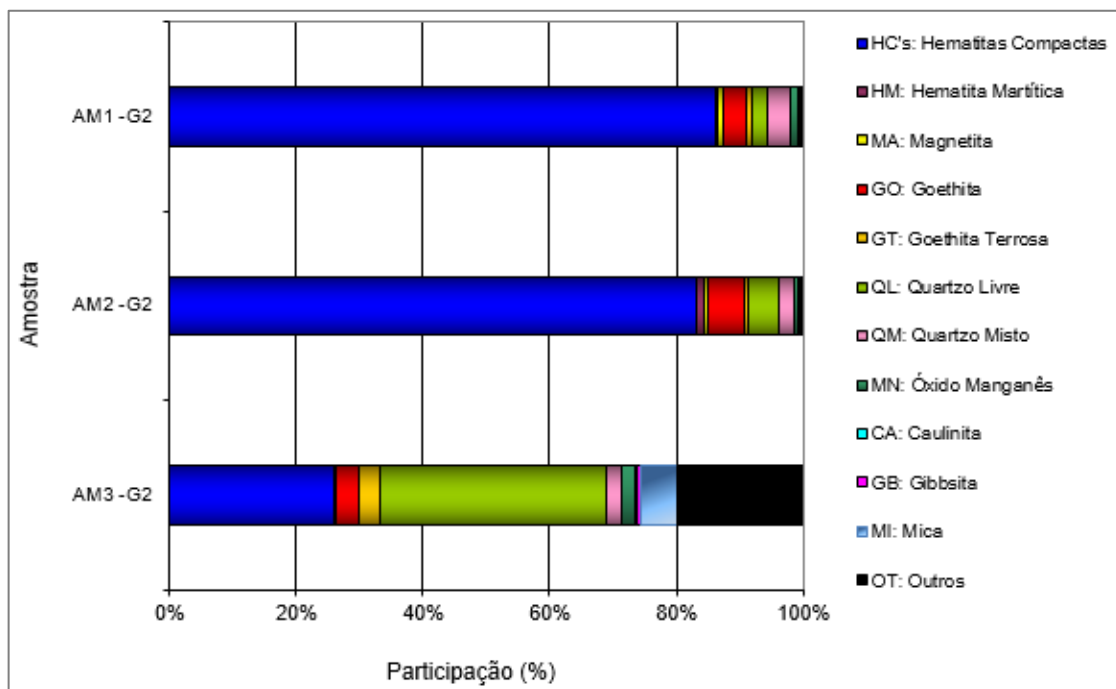


Figura 5.5 Quantificação mineralógica grupo de amostras G2 (CPT – VALE, 2016).

Em relação aos minerais deletérios, assim como encontrado em algumas amostras do grupo G1, as amostras AM1-G2 e AM3-G2 apresentam valores significativos para minerais de manganês, já a gibbsita e caulinita têm teor baixo nas três amostras.

Quando analisados no microscópio de luz refletida, as hematitas compactas ocorrem com grãos de vários tipos morfológicos: especular, lamelar, granular e sinuosa, sendo esta última predominante, conforme figura 5.6.

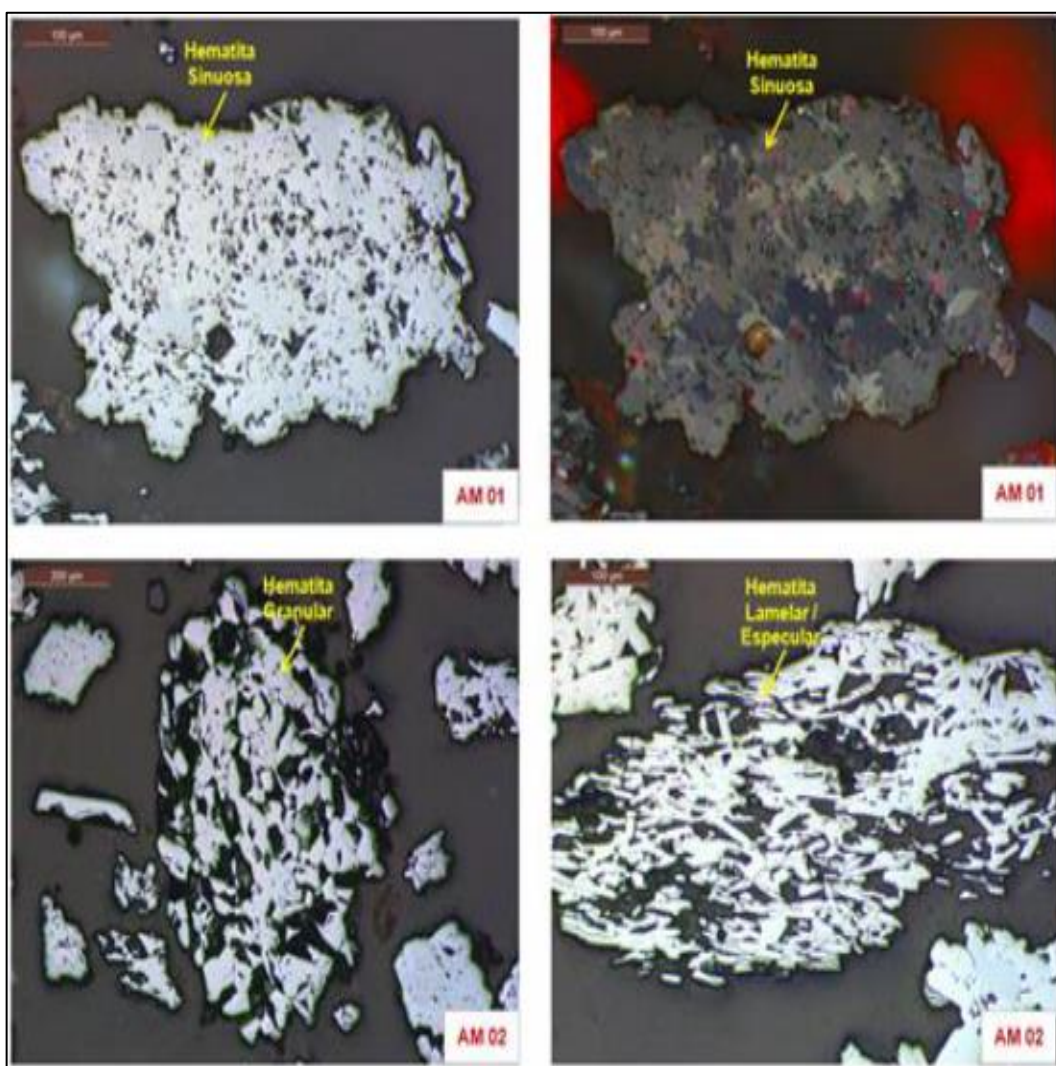


Figura 5.6 Formas de ocorrência de hematita – Amostras G2 (CPT – VALE, 2016).

A figura 5.7 apresenta fotomicrografias ilustrando a principal forma de ocorrência das goethitas, que se encontram predominantemente na forma maciça, livres e raramente associadas às hematitas e quartzo. A ocorrência de goethita terrosa, a qual aparece ao microscópio de luz refletida com coloração variada, tal como marrom clara/ amarelada, somente é significativa na amostra AM3-G2. De maneira geral, nesse grupo de amostras a participação de goethita é baixa.



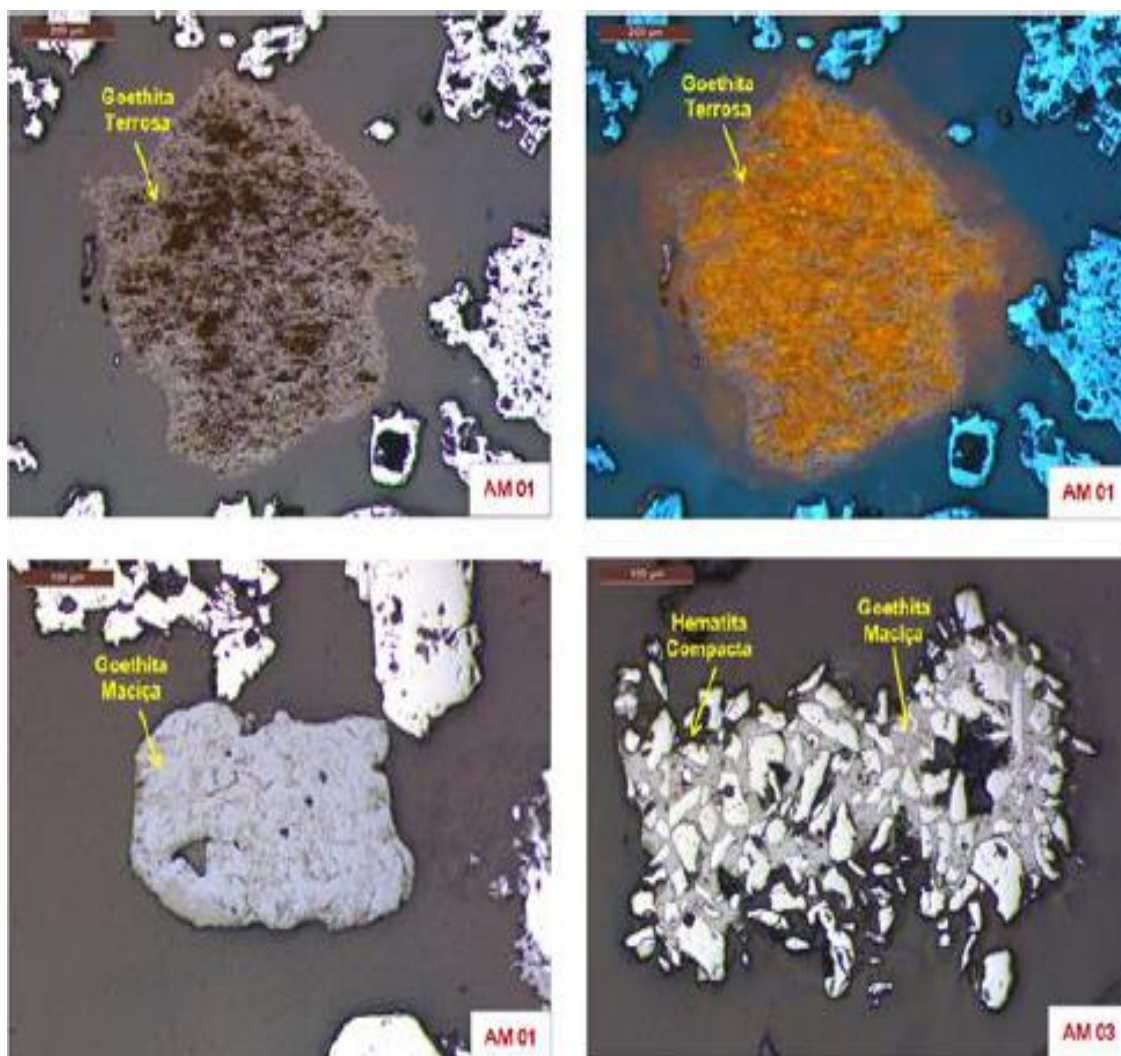


Figura 5. 7 Formas de ocorrência de goethita – Amostras G2 (CPT – VALE, 2016).

No que tange à presença de quartzo das amostras do grupo G2, a principal forma de ocorrência do mesmo é predominantemente rugosa, não possuindo recobrimento e nem tão pouco inclusão de óxido de ferro; a ocorrência de quartzo associado aos minerais ferrosos é significativa nas três amostras. Já com relação aos contaminantes, assim como nas amostras do grupo G1, as ocorrências dos principais minerais contaminantes são a gibbsita, caulinita, mica e outros minerais, sendo que os minerais de manganês ocorrem tanto livre como associado às hematitas, em partículas que tendem em constituir rejeito em processo de concentração magnética. Caulinita e gibbsita têm baixo teor nas amostras. A figura 5.8 evidencia estes aspectos.

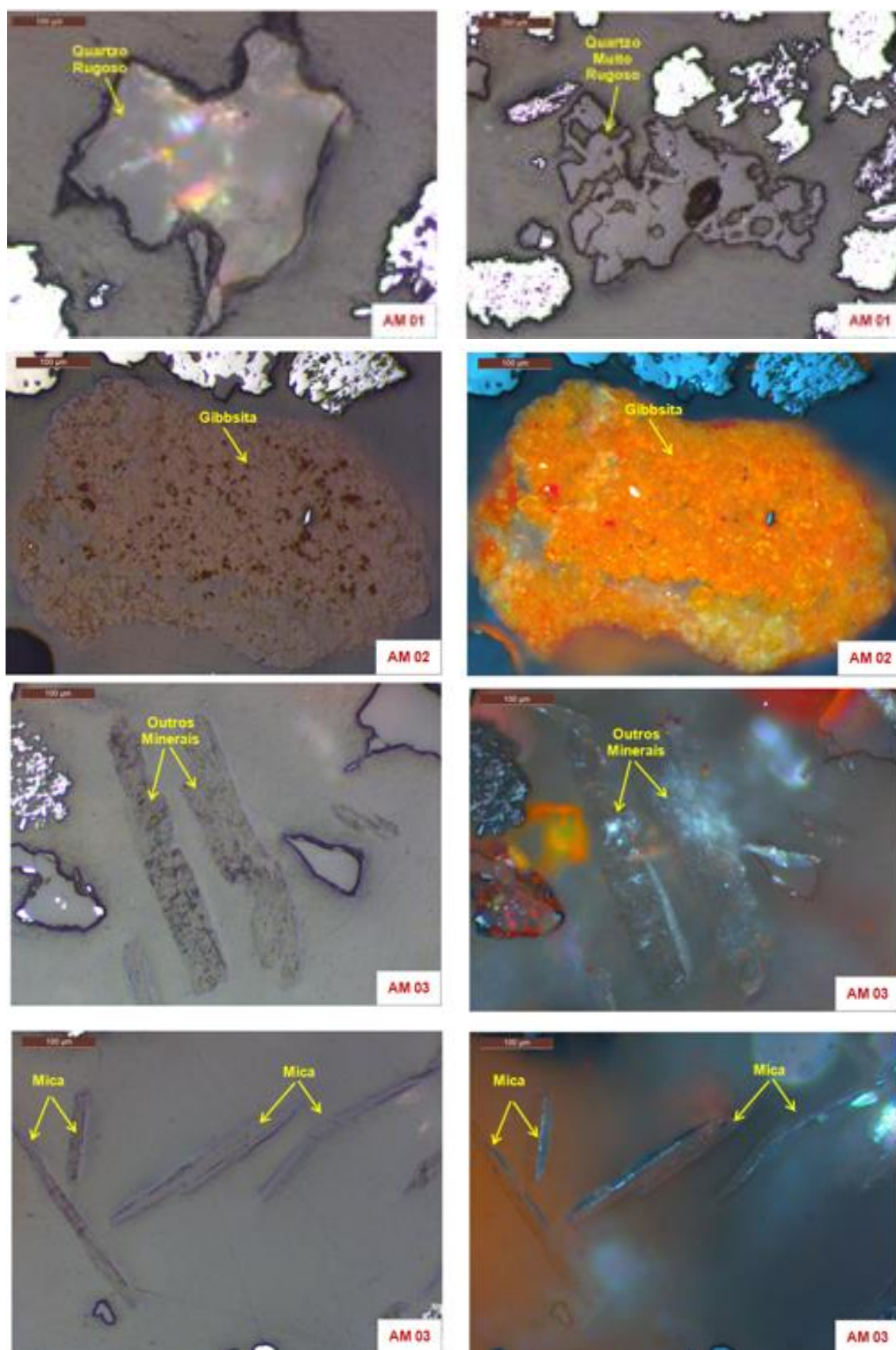


Figura 5.8 Formas de ocorrência de quartzo e contaminantes– Amostras G2 (CPT – VALE, 2016).

### 5.1.3 Análise por Difractometria de Raios-X

Como mencionado no início desse capítulo, apenas as amostras do grupo G1 foram direcionadas para difratometria de raios-X. Os resultados encontrados nesta análise também mostraram a presença forte do mineral hematita em todas as quatro amostras; além disso, foi detectada a presença de goethita, caulinita e talco (principalmente na amostra AM1 – G1). Essas informações podem ser verificadas conforme figura 5.9 e tabela V.5.

Tabela V.5 - Estimativa da composição modal das amostras G1. (CPT – VALE, 2017).

GRUPO G1 (Amostras)	Estimativa da Composição Modal pelo Método de Rietveld (%)				
	Goethita	Quartzo	Hematitas	Caulinita	Talco
AM 1 - G1	12,90	14,40	59,00	1,50	12,20
AM 2 - G1	9,40	25,00	58,50	1,10	5,90
AM 3 - G1	8,40	21,60	59,90	1,00	9,10
AM 4 - G1	4,30	25,30	65,00	0,60	4,80

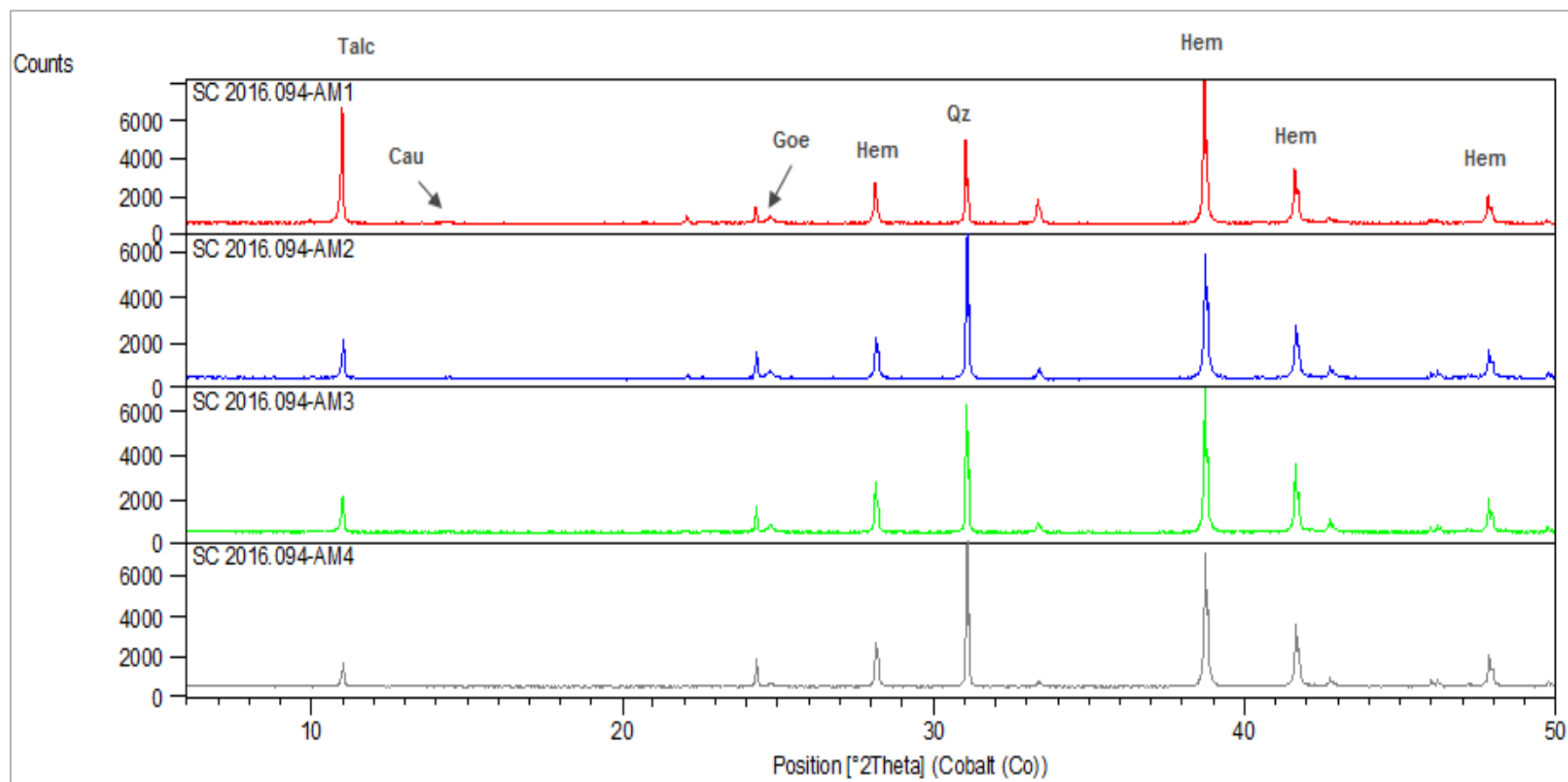


Figura 5.9. Gráfico comparativo dos difratogramas gerados das amostras G1 (CPT – VALE, 2017).

#### 5.1.4 Análise por QEMSCAN

Com as amostras do grupo G1, também foi realizada análise por QEMSCAN. A tabela V.6 mostra os resultados de quantificação mineralógica obtidos.

Conforme os dados apresentados, foram identificados vários minerais, sendo classificados como silicatos, óxidos, hidróxidos, carbonatos e outros minerais, sendo que destes, com grande predominância do óxidos e silicatos.

Como citado por GONÇALVES (2015) em seu trabalho, por uma característica construtiva intrínseca ao sistema QEMSCAN com fonte de tungstênio, não é possível o discernimento entre os óxidos de ferro, sendo estes agrupados em uma única fase.

Observa-se a partir das análises de QEMSCAN, elevada presença de óxido de ferro em todas as quatro amostras, principalmente na amostra AM4-G1; dentre os minerais de ganga, constata-se a predominância do quartzo e talco.

Vale destacar a elevada presença de talco encontrado na amostra AM1-G1, evidenciada não somente pela microscopia eletrônica de varredura automatizada, mas também pelos ensaios de difratometria de raios-X (há certa dificuldade de evidenciar o talco através do microscópio de luz refletida, uma vez que o mesmo é transparente, o que gera dificuldade de identificação).

Como fonte de sílica nessas amostras, o talco e a grunerita contribuem significativamente; já a alumina é oriunda da caulinita, gibbsita, clorita e biotita. O contaminante magnésio é oriundo do talco e em menor proporção da clorita; já os minerais de manganês são fontes de manganês e alumínio. Em contrapartida, a presença de carbonatos é praticamente nula em todas as amostras.

Vale ressaltar que, apesar da participação extremamente baixa, (em alguns casos, nulo), os minerais pirita, apatita e moscovita foram mantidos no resultado da composição modal, devido à sua importância para o conhecimento dos produtos obtidos através do beneficiamento do minério de ferro. Isto se deve à importância dos elementos deletérios fósforo, enxofre e álcalis nos insumos siderúrgicos.

Tabela V.6 -Quantificação mineralógica das amostras G1, via QEMSCAN. (CPT – VALE, 2017).

GRUPO G1 (Amostras)	Quantificação Mineralógica (%)										
	Óxidos de Fe	Silicatos									
		Quartzo	Clorita	Biotita	Grunerita	Actinolita	Caulinita	Talco	Feldspatos	Zircão	Outros Silicatos
$Fe_2O_3Fe_3O_4$ $FeO(OH)$ $xnH_2O$	$SiO_2$	$(Mg,Fe)_3$ $(Si,Al)_4O_{10}$ $(OH)_{2x}$ $(Mg,Fe)_3(OH)_6$	$K(Mg,Fe)_3$ $[Si_3AlO_{10}]$ $(OH,F)_2$	$Fe_7[Si_8O_{22}]$ $(OH)_2$	$Ca_2(Mg,Fe)_5$ $[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$	$Al_2Si_2O_5$ $(OH)_4$	$Mg_3Si_4$ $O_{10}(OH)_2$	Vários	$ZrSiO_4$	Vários	
AM 1 - G1	68,58	15,11	0,65	0,12	3,94	0,02	1,08	8,57	0,02	0,01	1,07
AM 2 - G1	65,97	26,11	0,18	0,10	1,67	0,03	0,58	4,20	0,03	0,00	0,38
AM 3 - G1	64,24	23,23	0,43	0,27	3,56	0,05	0,84	5,01	0,03	0,01	0,84
AM 4 - G1	70,77	23,70	0,11	0,07	1,26	0,02	0,29	2,44	0,02	0,00	0,28

GRUPO G1 (Amostras)	Quantificação Mineralógica (%)											
	Óxidos				Carbonatos				Outros			
	Gibbsita	Ilmenita	Rutilo	Óxidos de Mn	Ankerita	Siderita	Dolomita	Calcita	Apatita	Pirita	Muscovita	Outras Fases
$Al(OH)_3$	$FeTiO_2$	$TiO_2$	Vários	$Ca(Mg,Fe)$ $(CO_3)_2$	$FeCO_3$	$CaMg (CO_3)_2$	$CaCO_3$	$Ca_5(PO_4)_3$ $(F,OH,Cl)$	$FeS_2$	$KAl_2Si_3$ $AlO_{10}$ $(OH,F)_2$	Vários	
AM 1 - G1	0,57	0,00	0,00	0,06	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,17
AM 2 - G1	0,23	0,01	0,00	0,07	0,00	0,01	0,00	0,07	0,01	0,00	0,03	0,33
AM 3 - G1	1,04	0,00	0,00	0,23	0,00	0,01	0,00	0,02	0,03	0,00	0,04	0,13
AM 4 - G1	0,16	0,02	0,01	0,74	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,02	0,06

No que diz respeito ao grau de liberação das quatro amostras do grupo G1, 34% do quartzo encontrado nas amostras possui um grau de liberação acima de 90%, sendo que a amostra AM3 é a que apresenta maior grau de liberação; ao contrário, a amostra AM2 apresenta maior percentual de partículas mistas, conforme figura 5.10.

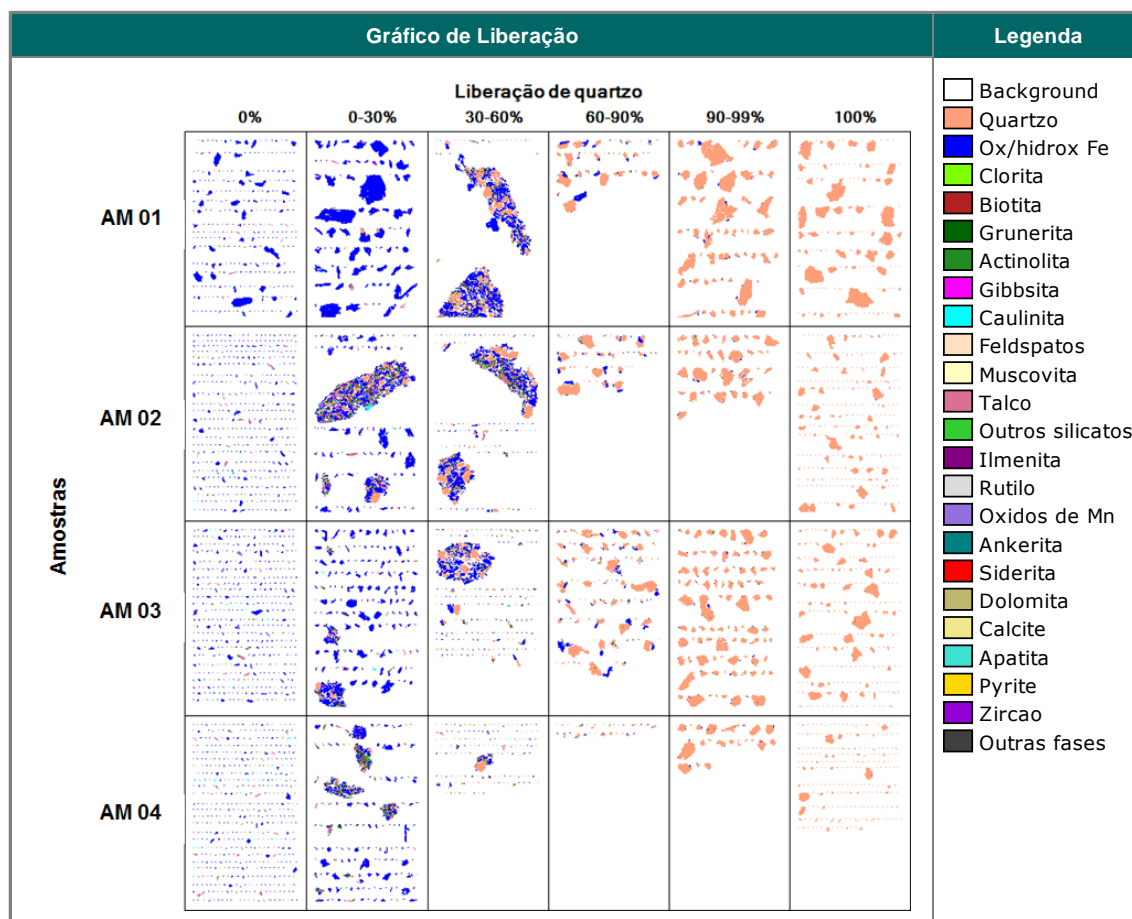


Figura 5.10 Grau de liberação do quartzo, grupo de amostras G1 (CPT – VALE, 2017).

As figuras de 5.11 a 5.14 apresentam respectivamente as imagens digitais obtidas via microscopia eletrônica de varredura automatizada para as quatro amostras, iniciando na AM1-G1, finalizando na amostra AM4-G1.

Conforme figura 5.11, observa-se a predominância de óxidos de ferro, os quais apresentam formas diferentes. Além desse mineral, há também a presença de quartzo livre e misto; quando misto, o quartzo aparece basicamente associado ao óxido de ferro. Há também presença de talco e até mesmo caulinita e grunerita, que não puderam ser percebidos via microscopia ótica.

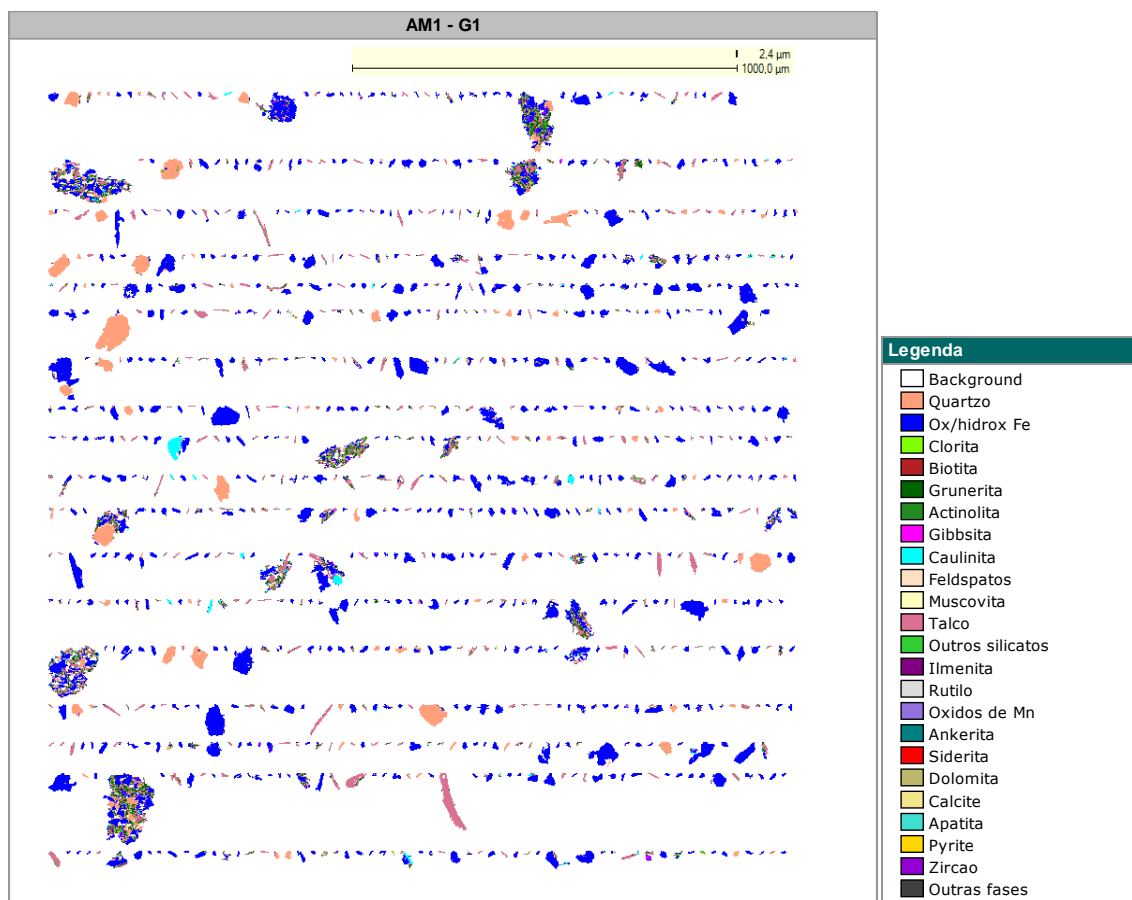


Figura 5.11 Imagem digital obtida no QEMSCAN, amostra AM1-G1 (CPT – VALE, 2017).

Pela figura 5.12, observa-se também predominância de óxido de ferro, contudo, diferente da amostra AM1, na amostra AM2 observa-se uma maior quantidade de quartzo. Pode-se verificar nessa amostra a presença de partículas de formatos diversos e na maioria dos casos, mistas. Há também presença de talco associado ao óxido de ferro, e até mesmo clorita, grunerita e outras associações.



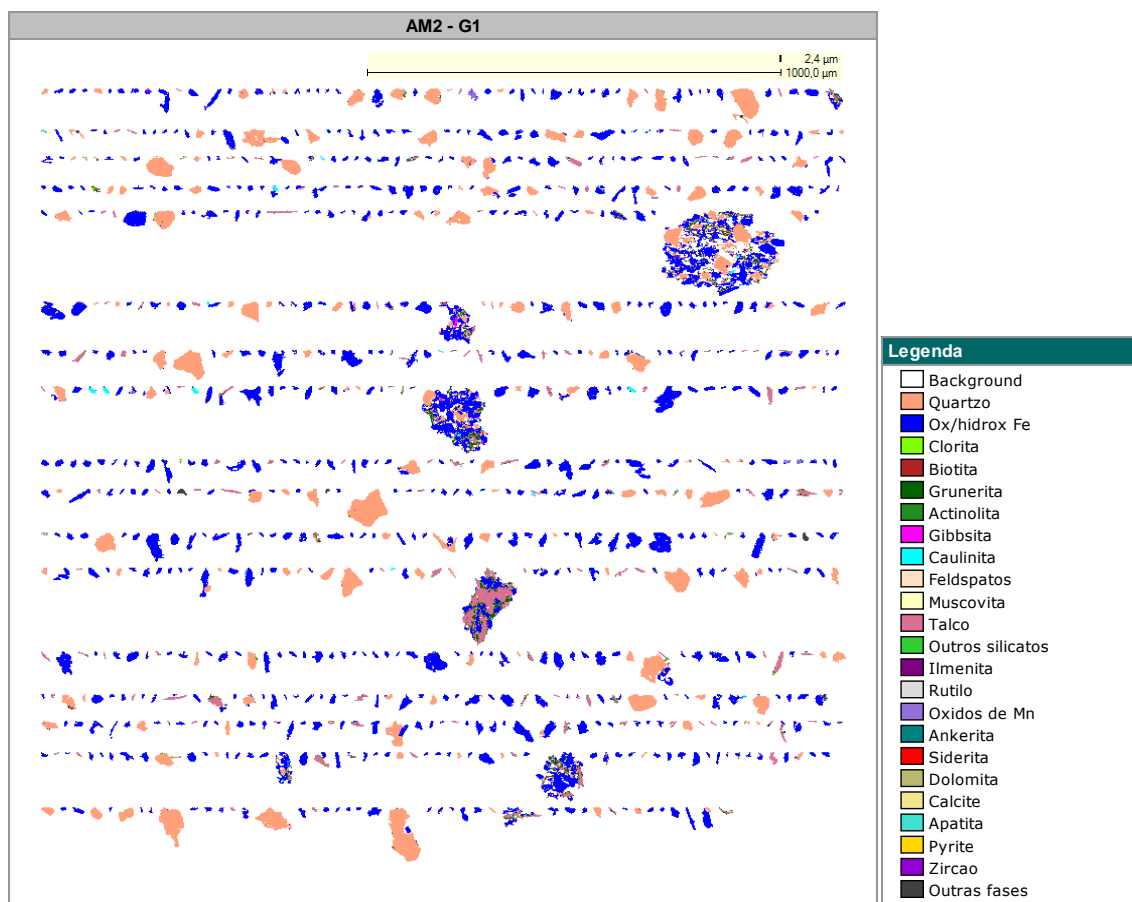


Figura 5.12 Imagem digital obtida no QEMSCAN, amostra AM2-G1 (CPT – VALE, 2017).

Pela figura 5.13, observa-se também predominância de óxido de ferro, contudo, em menor quantidade que nas amostras anteriores. Nota-se a presença relevante de quartzo, tanto em partículas livres (principalmente) e mistas. Vale ressaltar a presença de grunerita, talco e gibbsita livre associadas ao óxido de ferro.

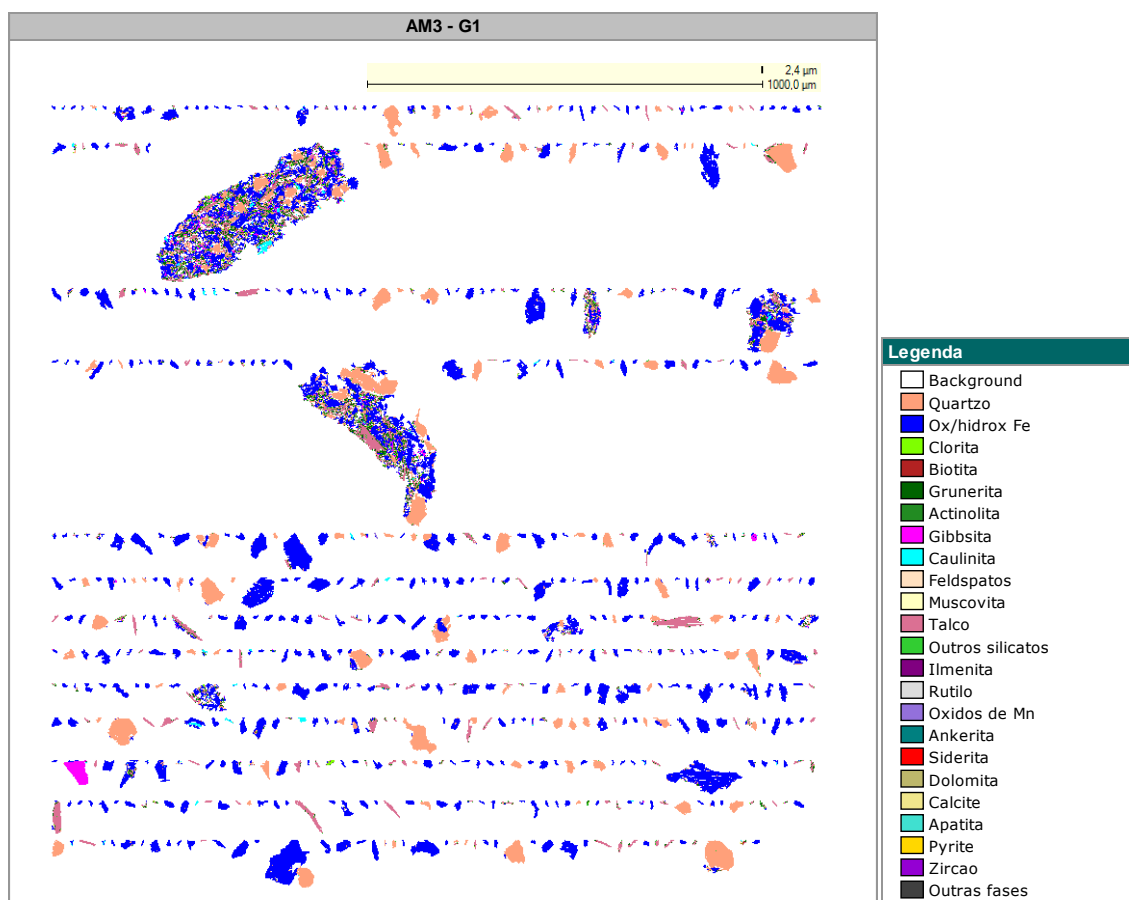


Figura 5.13 Imagem digital obtida no QEMSCAN, amostra AM3-G1 (CPT – VALE, 2017).

Já a figura 5.14 descreve a amostra AM4, onde observa-se também predominância de óxido de ferro, nesse caso, bem maior que nas demais amostras. Nota-se presença relevante de quartzo, tanto em partículas livres e mistas. Vale ressaltar que dentre os outros minerais, constata-se presença talco, grunerita, caulinita associadas ao óxido de ferro.

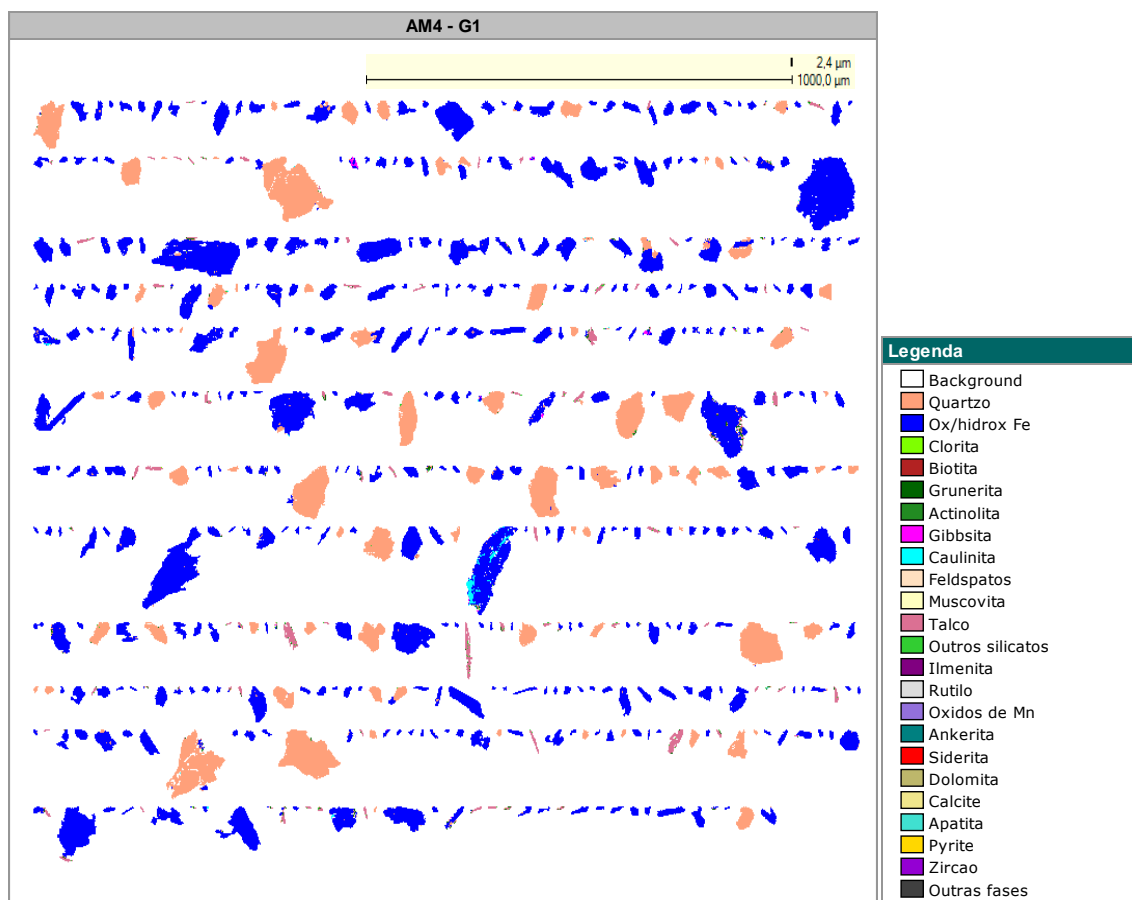


Figura 5.14 Imagem digital obtida no QEMSCAN, amostra AM4-G1 (CPT – VALE, 2017).

Além das imagens digitais, foram obtidas imagens de elétrons retroespalhados via QEMSCAN das amostras aqui estudadas. Conforme observa-se na figura 5.15, estas imagens exemplificam as características como morfologia e textura das amostras descritas anteriormente.

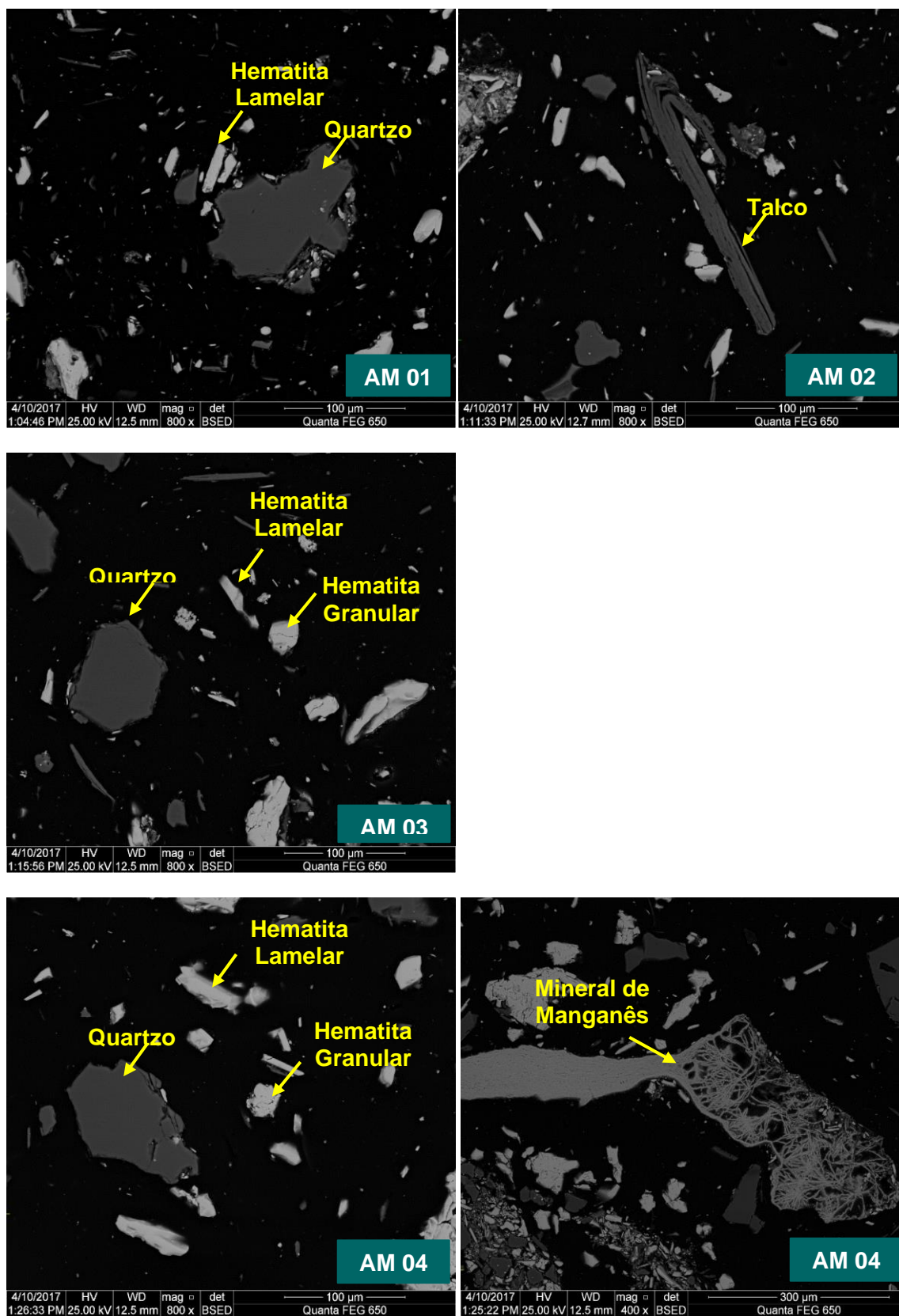


Figura 5.15 Imagens de elétrons retroespalhados no QEMSCAN, amostras G1 (CPT – VALE, 2017).

Observação sobre o mineral de manganês: o elemento manganês apareceu em quantidades baixas, mas significativas nas análises químicas. Já na difratometria de raios-X nenhum mineral de manganês foi identificado. Isto se deve à concentração baixa deste mineral ou minerais. Na microscopia de luz refletida, apareceu um mineral, descrito como óxido de manganês. O mesmo aconteceu na análise de QEMSCAN. Neste último caso, a análise EDS não detecta o elemento hidrogênio; aliás, nenhum método de espectrometria de raios-X, nem EDS nem WDS, detecta este elemento. Então, com os dados disponíveis nesta pesquisa, não se pode concluir que o mineral de manganês é apenas um “óxido de manganês”. Pode realmente ser um óxido, mas também pode tratar-se de um hidróxido ou um intercrescimento de ambos. Então, prefere-se, neste trabalho, usar o termo genérico, porém correto, de “mineral de manganês”.

## **5.2. Testes em Bancada**

Este subcapítulo expõe os resultados mais relevantes encontrados nos ensaios de bancada para os testes de concentração magnética e separação sólido-líquido (espessamento e filtragem), realizados com as amostras do grupo G2.

### *5.2.1 Teste em Bancada – Concentração Magnética*

A tabela V.7 apresenta os principais resultados dos testes de concentração magnética de alta intensidade, realizados com a fração -2,0mm no concentrador eletromagnético modelo Micromag. No que diz respeito aos testes de concentração magnética de baixa e média intensidade, não houve necessidade de fazê-los, uma vez que o percentual de partículas ferromagnéticas é pequeno.

Por se tratar de amostras com elevados teores de ferro, todos os testes foram realizados com GAP de 2,5mm, campo magnético de 13000 Gauss e sem produção no circuito de médio (água de lavagem do médio fechada), sendo explorado somente o percentual de sólidos da polpa de alimentação, com valor máximo limitado em 45%, devido à dificuldade de bombeamento de material grosso (*top size* próximo de 2,0mm).

Tabela V.7 - Resultados dos testes de concentração magnética – Amostras G2 (CPT – VALE, 2017).

Amostra	Fluxo	Recuperação em Massa (%)	Análise Química Global (%)						Sólidos Alimentação (%)	GAP (mm)	Campo Magnético (Gauss)
			Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	P (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Mn (%)	PPC (%)			
AM1 - G2	Alimentação	100,00	51,14	23,47	0,028	0,37	0,386	0,05	34,84	2,5	13000
	Concentrado	67,06	63,17	7,94	0,025	0,20	0,304	0,06			
	Rejeito	32,94	26,65	55,09	0,035	0,71	0,55	0,02			
AM2 - G2	Alimentação	100,00	51,73	22,48	0,028	0,39	0,383	0,05	40,26	2,5	13000
	Concentrado	69,38	62,40	8,75	0,025	0,24	0,301	0,06			
	Rejeito	30,62	27,55	53,58	0,035	0,73	0,567	0,02			
AM3 - G2	Alimentação	100,00	52,12	21,44	0,027	0,37	0,386	0,05	43,65	2,5	13000
	Concentrado	69,68	62,72	7,72	0,022	0,18	0,290	0,06			
	Rejeito	30,32	27,74	52,98	0,039	0,81	0,606	0,02			

Vale ressaltar que, para as três amostras analisadas, não há grandes diferenças nos resultados dos testes, verificando-se ainda que os teores de sílica dos testes estão compatíveis com os valores estimados pela mineralogia dessas amostras analisadas. Observa-se também uma pequena variação na recuperação em massa e qualidade do concentrado, sendo que a amostra AM3 – G2 apresentou melhor resultado, uma vez que apresentou um concentrado de menor teor de SiO<sub>2</sub> (7,72%) e a melhor recuperação em massa (69,68%).

### 5.2.2. Teste em Bancada – Filtragem (Leaf Test)

Os testes de filtragem (*leaf test*) foram realizados com o concentrado gerado na concentração magnética. No primeiro momento, foram realizados testes exploratórios visando a definição do tecido filtrante a ser utilizado no ensaio propriamente dito. Para esses, foram escolhidas as amostras AM2-G2 e AM3-G2, uma vez que estas possuíam maior quantidade de massa disponível.

Com relação aos parâmetros de processo, foram adotados em todos os testes uma pressão de vácuo de formação e secagem de 20pol/Hg ou 508mm/Hg (referente à altitude onde se localizava a Instalação de Tratamento de Minério a úmido da mina em estudo), uma polpa com percentual de sólidos na alimentação de 65% e pH de 7,5.

Para validação do melhor elemento filtrante, os parâmetros avaliados foram o percentual de sólidos no filtrado, umidade da torta e TUF (taxa unitária de filtragem). Para se definir como alto desempenho, o elemento filtrante deve possibilitar o menor percentual de sólidos no filtrado, baixa umidade na torta e alta TUF. Na tabela V.8, observam-se os resultados dos ensaios, sendo que o tecido S12BR6-1 apresentou melhor desempenho.

Tabela V.8 - Resultados dos testes exploratórios de filtragem: definição do elemento filtrante (CPT – VALE, 2017)

Amostra	Tecido Filtrante	Sólidos na Polpa (%)	pH	Pressão de vácuo (pol/Hg)		Tempo de Filtragem (s)			Sólidos Filtrado (%)	Espessura da torta (mm)	Umidade Torta (%)	TUF (th/m <sup>2</sup> )
				Formação	Secagem	Formação	Secagem	Ciclo				
AM2 - G2 Concentrado	Albany - 11363 U	65	7,5	20	20	50	30	178	0,99	22,91	12,08	0,98
	S12BR6-1	65	7,5	20	20	27	30	98	0,13	22,93	11,34	1,78
AM3 - G2 Concentrado	Albany - 11363 U	65	7,5	20	20	28	30	102	1,38	22,72	12,01	1,85
	S12BR6-1	65	7,5	20	20	25	30	89	0,22	23,22	9,44	1,98

A partir dos testes exploratórios e seus resultados, foram realizados os ensaios de filtragem propriamente ditos, sendo estes realizados com o concentrado gerado na concentração magnética das amostras AM2-G2 e AM3-G2 (somente essas amostras tiveram massa suficiente para testes). A tabela V.9 mostra o resumo desses testes, para os quais foram adotados um percentual de sólidos na polpa de 65%, um pH de 7,5, uma espessura de torta na ordem de 25 mm, considerando um *range* de umidade variando de 9% a 12%.

Tabela V.9 - Resultados teste de filtragem (Leaf Test) – Concentrado magnético (CPT – VALE, 2017)

Amostra	Tecido Filtrante	Sólidos na Polpa (%)	pH	Espessura (mm)	Umidade mínima obtida(%)	Tempo de Ciclo (s)	Umidade Torta (%)	TUF (t/h/m <sup>2</sup> )
AM2 - G2 Concentrado	S12BR6-1	65	7,5	25	7,26	108,75	9,00	1,36
						80,00	9,55	1,85
						62,88	10,00	2,35
						39,34	11,00	3,36
						27,24	12,00	5,43
AM3 - G2 Concentrado	S12BR6-1	65	7,5	25	8,61	206,16	9,00	0,68
						116,68	10,00	1,20
						80,00	10,70	1,75
						68,79	11,00	2,04
						43,15	12,00	3,25

Conforme a tabela V.9, para esses testes foram obtidos dados de umidade mínima obtida e a umidade para um tempo de ciclo de 80 segundos (tempo de referência para a filtragem em escala industrial). Verificou-se que a umidade mínima obtida para a amostra AM2-G2 foi de 7,26%, contra 8,61% na amostra AM3-G2. Considerando o tempo de ciclo máximo de 80 segundos, a umidade da torta e a TUF que são respectivamente: 9,55% e 1,85 t/h/m<sup>2</sup> na amostra AM2-G2, e para a amostra AM3-G2, 10,70% e 1,75 t/h/m<sup>2</sup>, conclui-se que estes valores estão assim dentro dos parâmetros aceitáveis de produto.

### 5.2.3 Teste em Bancada - Sedimentação

Os testes de sedimentação foram realizados com a fração -0,075mm do rejeito da concentração magnética das amostras AM2-G2 e AM3-G2, pois que a amostra AM1-G2 já se encontrava naturalmente na fração abaixo de 0,15mm, não gerando massa para os testes de concentração magnética, conforme mencionado nos tópicos anteriores.



Devido à indisponibilidade de massa na fração -0,075mm, não foi possível realizar os testes exploratórios de sedimentação (ensaios expeditos realizados em provetas de 500 ml para definição de parâmetros, tais como o tipo de floculante, pH, percentual de sólidos inicial e dosagem de floculante). Assim sendo, os testes propriamente ditos foram realizados com o floculante *Flonex 923-SH*, que geralmente apresenta bom desempenho nos testes de sedimentação realizados com minérios de ferro.

Com relação aos demais parâmetros de processo, foi definido trabalhar com o pH da polpa básico, em torno de 7,5, um percentual de sólidos inicial em torno de 19% (percentual máximo permitido para rejeito de minério de ferro) e foram exploradas três dosagens de floculantes (0g/t, 10g/t e 20g/t).

A tabela V.10 apresenta os principais resultados obtidos nos testes de sedimentação e a figura 5.16 mostra as fotos da proveta, tendo como foco o sobrenadante.

Tabela V.10 - Resultados teste de sedimentação – fração -0,075mm do rejeito da concentração magnética (CPT – VALE, 2017)

Amostra	Percentual de Sólidos na Polpa (%)		pH	Floculante ( <i>Flonex 923 SH</i> )	Velocidade Sedimentação	Área Unitária
	Inicial	Final		Dosagem	(m/h)	(M <sup>2</sup> /t/dia)
AM2 - G2 Rejeito da Concentração Magnética	19,39	55,67	7,5	0	0,68	0,422
	19,11	56,76		10	2,55	0,307
	19,39	51,70		20	11,91	0,107
AM3 - G2 Rejeito da Concentração Magnética	19,31	58,85	7,5	0	0,43	0,663
	19,23	53,77		10	4,48	0,378
	19,40	49,72		20	13,18	0,245

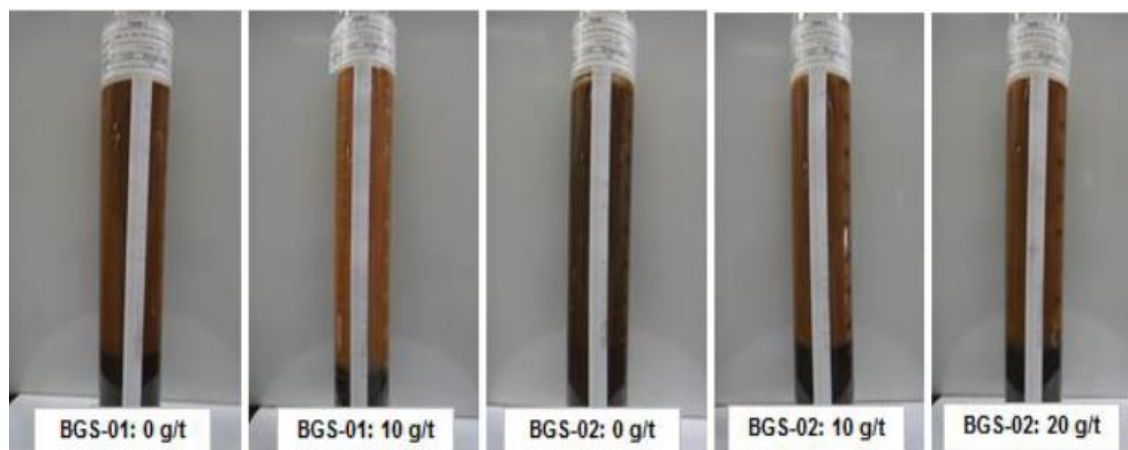


Figura 5.16 Registro dos testes de sedimentação em proveta (CPT – VALE, 2017)

Com base nos dados apresentados acima, constata-se que a área unitária de espessamento variou de 0,107 a 0,422 m<sup>2</sup>/t/dia para a amostra AM2-G2 e 0,245 a 0,663m<sup>2</sup>/t/dia para a amostra AM3-G2. Observa-se ainda que a qualidade da água sobrenadante ficou ruim, apresentando clarificação indesejada em todos os testes, independente da dosagem de floculante. No que diz respeito à velocidade de sedimentação, quando comparadas as amostras AM2-G2 e AM3-G2, com dosagens de floculante em 10g/t e 20g/t, observou-se que esta velocidade nas amostras AM3-G2 é maior que nas amostras AM2-G2. Isto pode ter sido a causa do baixo percentual de sólidos no processo final dessas amostras; contudo, apesar de não se ter referências da escala industrial para espessamento de rejeito, aceitam-se como satisfatórios os valores obtidos.

#### *5.2.4 Rota de Processo*

Com relação aos resultados obtidos de caracterização das amostras do grupo G1, observou-se pelas análises de QEMSCAN a presença significativa de quartzo misto em todas as amostras, exceto na amostra AM3 – G1, e hematita compacta. Como apresentado anteriormente, não foi possível realizar testes de bancada com essas amostras, mas a partir dos dados de análise química, em que a amostras apresentaram teor médio de 47,42% Fe e 25,29% SiO<sub>2</sub>, e caracterização das partículas, pode-se realizar uma estimativa dos resultados para concentrado. Dessa forma, como essa amostra apresenta maior teor de sílica do que as amostras do grupo G2, acredita-se que o concentrado terá um valor maior de contaminantes, estima-se um concentrado próximo a 59,10% Fe e 5,41% SiO<sub>2</sub>, para um processo com recuperação em massa próximo a 59%.

Já com base nos resultados dos ensaios de caracterização e testes em bancada realizadas nas amostras do grupo G2, observou-se presença de quartzo misto nas amostras e também de hematita compacta. Além disso, os testes de concentração magnética de alta intensidade realizados com a fração -2,0mm apresentaram resultados satisfatórios, produzindo concentrados com teores de SiO<sub>2</sub> de aproximadamente 7,5%, teores de ferro próximos a 63,0%, recuperação mássica de 68,0%, com umidade máxima de 10,7%.

Com base nessas informações e sabendo que a barragem é composta basicamente pelo *blend* dessas amostras, com um teor médio conforme tabela V.11, foi proposta uma rota de beneficiamento para o material da barragem. A rota consta de uma etapa de escalpe da fração maior que 1mm, seguindo pela etapa de concentração magnética para a fração menor que 1mm e finalizando com as etapas de separação sólido líquido.

Tabela V.11 - Granuloquímica da amostra média da barragem Gongo Soco (CPT – VALE, 2016)

Fração Granulométrica	Retido (%)	Análise Química				
		Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	P (%)	Mn (%)
+1 mm	8,85	53,99	16,78	0,04	0,91	0,67
-1mm +0,15mm	21,71	58,43	13,53	0,03	0,60	0,68
-0,15 mm	69,44	52,54	21,30	0,03	0,41	0,40
Global	100,00	53,94	19,21	0,03	0,50	0,48
-1mm	91,15	53,94	19,45	0,03	0,46	0,46

Em seguida, foi realizada uma estimativa/simulação de massa, a fim de verificar quantitativamente a massa a ser recuperada da barragem. Na tabela V.12 constam os principais resultados referentes ao balanço de massa do circuito de concentração magnética; já o balanço de massa geral pode ser verificado de forma detalhada, conforme figura 5.17.

Tabela V.12 -Principais dados do balanço de massa – circuito concentração magnética (Próprio autor, 2017)

Fe Alimentação (%)	53,94
Fe Concentrado (%)	62,65
Fe Rejeito (%)	27,89
SiO <sub>2</sub> Concentrado(%)	7,00
Recuperação em Massa (%)	75,00
Recuperação Metalúrgica(%)	87,05
Produtividade (t/h)	457,26
Produção Ano (Mta)	1,03

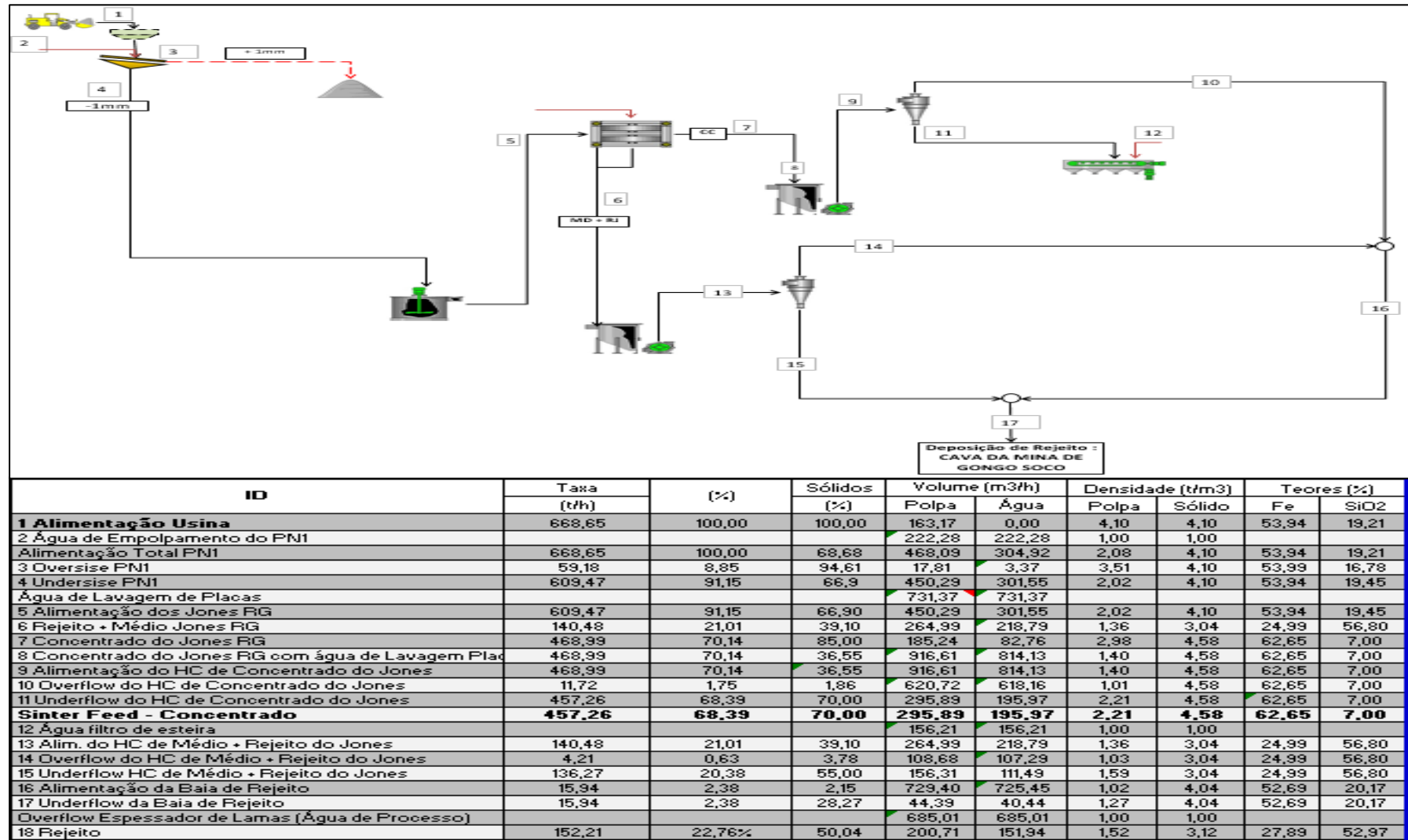


Figura 5.16 Rota de processo e BM Detalhado (Próprio Autor – 2017).

## 6. CONCLUSÕES

A partir dos dados apresentados pela caracterização mineralógica, principalmente DRX e QEMSCAN, com relação às amostras do grupo G1, as mesmas apresentaram presença significativa de quartzo misto em todas as amostras, exceto na amostra AM3-G1, e hematita compacta. Ainda pela caracterização mineralógica, constatou-se que as amostras do grupo G2 também apresentam presença tanto de quartzo misto como hematita compacta.

Importante ressaltar que a difração de raios-X e o QEMSCAN possibilitaram identificar minerais que não foram detectados pela microscopia ótica, contribuindo significativamente para as análises, uma vez que foi possível verificar o real grau de liberação de quartzo nas amostras e a presença de talco e mineral de manganês.

Não foi considerada a hipótese de realizar testes de concentração por flotação, devido à relação custo-benefício não ser viável, pois o volume de rejeito existente na Barragem Sul Superior é baixo, tendo em vista o CAPEX/OPEX necessário para a implantação de uma instalação de flotação, inviabilizando assim o estudo dessa possível rota de processo. Além do fator econômico, há também condicionantes geotécnicos da barragem, que não possibilitam a lavra em regiões cujo percentual da fração -0,15mm é relativamente alto.

Dessa forma, foram realizados testes de concentração magnética, feitos somente com as amostras do grupo G2. Nesses testes, com alta intensidade de campo magnético, com a fração -2,0mm, os resultados foram satisfatórios, produzindo concentrados com teores de SiO<sub>2</sub> de aproximadamente 7,5%, teores de ferro próximos a 63,0%, recuperação mássica de 68,0%, com umidade máxima de 10,7% após filtragem.

A partir da caracterização mineralógica, dos testes de bancada e tendo em vista que a barragem é composta pelo *blend* das amostras dos grupos G1 e G2, com uma composição química da fração menor que 1mm com 53,94% Fe e 19,45% SiO<sub>2</sub>, pôde-se fazer uma estimativa de qualidade e massa, obtendo um concentrado com teores próximos a 62,6% Fe e 7,0% SiO<sub>2</sub>, recuperação mássica de 75% e recuperação metalúrgica de 87,05%.

Dessa forma, esse material poderia ser classificado como fino comum (definição dada à massa na fração menor que 1mm), que poderá compor o *blend* de produtos da empresa de mineração para ser destinado à sinterização. Este concentrado poderia ser utilizado como subproduto para blendagem com outros produtos, maximizando o aproveitamento de recursos.

Portanto, pode-se afirmar que o rejeito estudado pode ser aproveitado a partir da rota de processo proposta.

## 7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentro do tema do trabalho realizado (caracterização de rejeito de minério de ferro, com foco na definição de rota de processo), algumas propostas para trabalhos futuros são recomendadas, tais como realizar testes piloto, a fim de verificar em campo os resultados obtidos em laboratório.

Além disso, sugere-se realizar outros testes em escala de bancada, variando a recuperação em massa em detrimento da qualidade do produto, já que quanto menor o teor de contaminantes ( $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), menor é a recuperação em massa do circuito, avaliando assim o *trade off* produção x qualidade de produtos.

Tendo em vista a máxima recuperação de rejeito, avaliar a possibilidade de reaproveitamento do rejeito gerado do processo de concentração magnética, investigando novas aplicações para este material, principalmente na área de ciência dos materiais.

Para demais rejeitos de minério de ferro, quando a mineralogia assim permitir, realizar ensaios de flotação, a fim de verificar se os indicadores de recuperação em massa, recuperação metalúrgica e qualidade dos produtos se sobrepõem aos resultados oriundos dos testes de concentração magnética.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, A. C., SANTOS, L. D., GIRODO A. C., PINTO C. L. L., GALÉRY R., PAPINI R. M., VALADÃO G. E. S., CASTRO L. F. A., TAVARES R. P. *Minérios de ferro: Processos de Obtenção e sua Utilização na Siderurgia*. Apostila do curso ABM, Belo Horizonte, MG, 2008.

BRANDÃO, P.R.G. *Notas de aula da disciplina "Métodos de Instrumentação e Análise"* - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015, 30p.

CHAVES, A.P. (2004), *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios*, vol. 2, 2ed, Ed. Signus, São Paulo - SP, 199 p.

CORREIA, J.C.G.; Classificação e Peneiramento. In: Da LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. *Tratamento de Minérios*. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Capítulo 6, p. 257-296.

De PAULA, N.N. *Estudos de correlação entre concentração magnética em escala de bancada, piloto e industrial*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia UFMG, 2014. 103p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e Minas).

DUTRA, C.V., GOMES, C.B. *A Fluorescência de Raios X Na Geologia*. In: *Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia*. São Paulo: Edgard Blücher, 1984. p. 84-120.

FRANÇA S.C.A, et al.; Separação Sólido-Líquido. In: Da LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. *Tratamento de Minérios*. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Capítulo 15, 637-678p.

FERNANDES, M.R.F. *Estudo das propriedades das argamassas refratárias úmidas com o tempo de estocagem*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia UFMG, 2012. 231p (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas).

GONÇALVES, T.A.R. *Técnicas de Microscopia Ótica, Microscopia Eletrônica de Varredura Automatizada (QEMSCAN®) e Análise de Imagens Aplicadas a Diferentes Tipologias de Minério de Ferro*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia UFMG, 2015. 182p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas).

GUIMARAES, N.C. *Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia UFMG, 2011. 114p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas).

JACKSON BR, SUTHERLAND DN, GOTTLIEB P, QUITTNER VH. QEM\*SEM: The Mineralogical Assessment System For *The Metallurgist*. In: *International Conference on Base Metals Technology*; 1989 February 8-10; Jamshedput, India. Australia: CSIRO; 1989. p. 471-483.



JENA, S.K.; SAHOO, H; RATH, S.S; RAO, D.S; DAS, S.K e DAS, B. Characterization and Processing of Iron Ore Slimes for Recovery of Iron Values. *Mineral Processing & Extractive Metall*, p174-182, abr-2015.

KAHN, H., *Difração de raios X – Notas de aula*, 17p., III Curso de Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Mineraias, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas, Laboratório de Caracterização Tecnológica, maio de 2001.

KLEIN, C.K; DUTROW, B. *Manual de Ciência dos Mineraias*; 23. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 724p.

NEUMANN, R., SCHNEIDER, C. L., NETO, A. A. Caracterização Tecnológica de Minérios. In: LUZ, A. B. *Tratamento de Minérios*. 4ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. p. 55-109.

NEUMANN, R., SCHNEIDER, C.L., ALCOVER NETO, A.; Caracterização tecnológica de minérios. In: Da LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. *Tratamento de Minérios*. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Capítulo 3, parte II, p.85-139.

PANDOLFO, F.G. *Análise Modal de Materiais Compósitos*. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2006. 75p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Materiais).

PERES, A.E.C. *Notas de aula da disciplina “Flotação”* - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015, 60p.

PERES, A.E.C.; SALUM, M.J.G.; VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C.; Concentração. In: VALADÃO, G.E.S.; ARAÚJO, A.C. (Org). *Introdução Tratamento de Minérios*, Belo Horizonte: UFMG, 2007, capítulo 6, 108-148p.

PINHEIRO W.F; FILHO, O.B.F.; NEVES, C.A.R. *Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas*, Brasília: DNPM, 2016.

QUEIROZ, L.A. *Caracterização de Minérios da Mina de Brucutu, Vale, focada na previsibilidade das operações de concentração mineral*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia UFMG, 2008. 430p (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e Minas).

QUEIROZ, L.A. e BRANDÃO, P.R.G. Aspectos Mineralógicos Relacionados à Concentração Magnética de Minério de Ferro Itabirítico. *Metalurgia & Materiais*, v. 65, p148-151, abr-2009.

ROBERTO, J. B. *Influência dos Diversos Tipos Litológicos nas Operações de Concentração da Instalação de Beneficiamento de Brucutu*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia UFMG, 2010. 119p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas).

ROCHA, J.M.P. *Caracterização Mineralógica de Minérios Goethíticos-Limoníticos da Mina de Alegria*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia UFMG, 1997. 263p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e Minas).

SALES, C.G. *Rotas de Beneficiamento para Recuperação de Minerais Portadores de Ferro do Underflow do Espessador de Lamas da Usina de Brucutu*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia UFMG, 2012. 136p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e Minas).

SAMPAIO J.A, et al.; Separação Magnética e Eletrostática. In: Da LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. *Tratamento de Minérios*. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Capítulo 9, 367-395p.

SANT'AGOSTINO, L.M.; KAHN, H., *Metodologia para Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Minerais*. São Paulo, BT/PMI/069 Departamento de Engenharia de Minas, 1997. 29p.

SANTOS, L.D, BRANDÃO, P.R.G. LM. SEM and EDS Study of Microstructure of Brazilian Iron Ores. *Microscopy and Analysis*, United Kingdom, vol.1, p17-19, jan-2005.

SILVERBLATT, C.E. e EASTON, J.H. (2002), Solid-Liquid Separation: Characterization of process objectives and general approach to equipment selection. *Mineral Processing Plant Design, Practice and Control*. Eds: Mular, A.L., Halbe, D.N. and Barratt, D.J., SME Inc., vol. 2, 1255-1261p.

TRAWINSKI, H. *Teoria, Aplicações e Emprego Prático dos Hidrociclones - AKW do Brasil Equipamentos para Mineração Ltda*. (s.n.t.).

VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. Separação Sólido-Líquido. In: VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. (Org). *Introdução Tratamento de Minérios*, Belo Horizonte: UFMG, 2007, capítulo 7, 141-162p.

WILLS, B.A. e NAPIER MUNN, T. J. *Mineral Processing Technology – An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 7. ed. Queensland: Elsevier Science & Technology Books, 2006. 442p.