



**DERILDO DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DAS VARIÁVEIS DA CONCENTRAÇÃO  
MAGNÉTICA PARA REMOÇÃO DOS MINERAIS PORTADORES DE ALUMINA E  
OBTENÇÃO DE PELLET FEED DENTRO DAS ESPECIFICAÇÕES DA  
PELOTIZAÇÃO**

**Parauapebas, PA**

**2023**

**DERILDO DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DAS VARIÁVEIS DA CONCENTRAÇÃO  
MAGNÉTICA PARA REMOÇÃO DOS MINERAIS PORTADORES DE ALUMINA E  
OBTENÇÃO DE PELLET FEED DENTRO DAS ESPECIFICAÇÕES DA  
PELOTIZAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista em Beneficiamento Mineral.

Área de concentração: Tratamento de Minérios

Orientador: Neymayer Pereira Lima, D.Sc

Coorientador: Franciano Carleti, M.Sc

Tatiane Rocha, M.Sc

**Parauapebas, PA**

**2023**

Título: Avaliação dos efeitos das variáveis da concentração magnética para remoção dos minerais portadores de alumina e obtenção de pellet feed dentro das especificações da pelotização.

**Classificação:** ( ) Confidencial ( ) Restrita ( ) Uso Interno ( X ) Pública

**Informações Confidenciais** - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

**Informações Restritas** - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

**Informações de Uso Interno** - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço.

**Informações Públicas** - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados.

### Dados Internacionais de Catalogação (CIP)

S253a

Souza, Derildo de

Avaliação dos efeitos das variáveis da concentração magnética para remoção dos minerais portadores de alumina e obtenção de pellet feed dentro das especificações da pelotização. Derildo de Souza - Ouro Preto, MG: ITV, 2023.

100 p.: il.

Monografia (Especialização latu sensu) - Instituto Tecnológico Vale, 2023.

Orientador: Neymayer Pereira Lima

Coorientadores: Franciano Carleti

Tatiane Rocha

1. Barragem rejeito. 2. Concentração Magnética. 3. Dragagem. 4. Minério I. Lima, Neymayer Pereira. II. Carleti, Franciano. III. Rocha, Tatiane. IV. Título.

CDD.23. ed. 627.8

Derildo de Souza

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DAS VARIÁVEIS DA CONCENTRAÇÃO  
MAGNÉTICA PARA REMOÇÃO DOS MINERAIS PORTADORES DE  
ALUMINA E OBTENÇÃO DE PELLET FEED DENTRO DAS  
ESPECIFICAÇÕES DA PELOTIZAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em [Beneficiamento Mineral].

Orientador: Prof. D.Sc. Neymayer Pereira Lima

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em 29 de novembro de 2023 pela banca examinadora constituída pelos professores:

---

Prof. D.Sc. Neymayer Pereira Lima  
Orientador – Vale

---

D.Sc. Gilmara Mendonça Lopes  
Membro externo – Vale

---

D.Sc. Klaydison Carlaile Silva  
Membro externo – Vale

Os Signatários declaram e concordam que a assinatura será efetuada em formato eletrônico. Os Signatários reconhecem a veracidade, autenticidade, integridade, validade e eficácia deste Documento e seus termos, nos termos do art. 219 do Código Civil, em formato eletrônico e/ou assinado pelas Partes por meio de certificados eletrônicos, ainda que sejam certificados eletrônicos não emitidos pela ICP-Brasil, nos termos do art. 10, § 2º, da Medida Provisória nº 2.200-2, de 24 de agosto de 2001 (“MP nº 2.200-2”).



## PROTOCOLO DE ASSINATURA(S)

O documento acima foi proposto para assinatura digital na plataforma Portal de Assinaturas Vale. Para verificar as assinaturas clique no link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/B8D2-6094-DDFD-825F> ou vá até o site <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> e utilize o código abaixo para verificar se este documento é válido. The above document was proposed for digital signature on the platform Portal de Assinaturas Vale . To check the signatures click on the link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/B8D2-6094-DDFD-825F> or go to the Website <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> and use the code below to verify that this document is valid.

Código para verificação: B8D2-6094-DDFD-825F



### Hash do Documento

981DEB56B709F0B8A3C36E6DE785620D89EC263433E96648EA69CD1FA61D2A46

O(s) nome(s) indicado(s) para assinatura, bem como seu(s) status em 29/01/2024 é(são) :

- Klaydison Carlaile Silva (Signatário) - 921.761.946-91 em 29/01/2024 09:16 UTC-03:00  
**Tipo:** Assinatura Eletrônica  
**Identificação:** Por email: [klaydison.silva@vale.com](mailto:klaydison.silva@vale.com); Código de acesso: 1

### Evidências

**Client Timestamp** Mon Jan 29 2024 09:16:09 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)  
**Geolocation** Latitude: -19.901584231677873 Longitude: -43.958166075069855 Accuracy: 126  
**IP** 177.55.225.79

### Hash Evidências:

84A78F77CCD4AE7996ADAC8AA23B0ACEFABEC79E658525A5A1EC071CDA4794BC

- Gilmar Mendonça Lopes (Signatário) - 067.352.986-08 em 29/01/2024 09:14 UTC-03:00  
**Tipo:** Assinatura Eletrônica  
**Identificação:** Por email: [gilmar.lopes@vale.com](mailto:gilmar.lopes@vale.com); Código de acesso: 1

### Evidências

**Client Timestamp** Mon Jan 29 2024 09:14:51 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)  
**Geolocation** Latitude: -19.97641 Longitude: -43.969328 Accuracy: 500  
**IP** 191.215.224.236

### Hash Evidências:

5DA731FBE9D9C3DF540A91363CD53AA4761928CD8063AD289C4311C90DEF6A31

- Neymayer Pereira Lima (Signatário) - 889.851.056-04 em 29/01/2024 09:14 UTC-03:00

**Tipo:** Assinatura Eletrônica

**Identificação:** Por email: neymayer.lima@vale.com; Código de acesso: 1

### **Evidências**

**Client Timestamp** Mon Jan 29 2024 09:14:49 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

**Geolocation** Latitude: -20.4078 Longitude: -43.526393 Accuracy: 12

**IP** 138.121.67.22

**Hash Evidências:**

57F52D45E5B353D746DF39A19690650A8C031513D60E1664ED489E31C047FFD1



Dedico este trabalho a Deus, pois tudo pertence a Ele, a minha amada família e amigos, que estão sempre ao meu lado, superando todos os desafios e fazendo desta caminhada um grande bálsamo, em especial a minha mãe (em memória e com grande saudade), pois sou resultado do seu amor e dedicação.

## **AGRADECIMENTOS**

Acima de Tudo Deus, criador e mantenedor de todas as coisas.

A empresa VALE S/A. por proporcionar essa grande oportunidade de ampliação do conhecimento. Aos meus gestores que tem depositado confiança em mim.

A minha família e amigos por todo o apoio e incentivo, tornando todos os dias maravilhosos. Quão feliz eu sou por tê-los ao meu lado, esposa Luanna, filhos João Victor e Luísa e irmã Deronia.

Ao ITV, fornecendo o que há de melhor para que o aprendizado seja um sucesso. A toda coordenação do curso, com a destaque para a coordenadora D.ra Iranildes Santos, pois está atenta aos mínimos detalhes, a fim de que o bom andamento seja sempre mantido, aos ilustres professores pela dedicação e compartilhamento do conhecimento e aos amigos construídos ao longo das aulas, que seguirão comigo na estrada da vida.

Ao time de trabalho, por tamanha compreensão nos momentos em que precisei ausentar para realizar alguma atividade ou participar de as aulas.

Aos meus fantásticos orientadores DSc Neymayer Pereira Lima, Engenheiro Franciano Carleti e DSc Tatiane Rocha, pois não mediram esforços nessa jornada, contribuindo grandiosamente para que o resultado desse trabalho seja relevante para o universo acadêmico e profissional.

“Tente mover o mundo – o primeiro passo será mover a si mesmo.” Platão

## RESUMO

Diante dos desafios e das perspectivas relacionadas à sustentabilidade no âmbito do setor de mineração, considerando a relevância no desenvolvimento econômico, torna-se fundamental adotar práticas de mineração responsáveis, que visem à redução e mitigação dos impactos oriundos das atividades. Desta forma, a sustentabilidade emerge como uma abordagem fundamental para lidar com estes desafios do setor mineral, que incluem a adoção de tecnologias mais limpas e eficientes, o uso responsável dos recursos hídricos, a recuperação de áreas degradadas, o tratamento adequado de rejeitos e a promoção de relações justas e transparentes com as comunidades afetadas. Por isso, o presente trabalho tem o intuito de apresentar um maior conhecimento sobre a característica da barragem do gelado, que pertence a Vale, localizada na Serra dos Carajás e beneficiá-lo via concentração magnética, de forma a atender ao setor de pelotização. Deste modo, este trabalho realizou a coleta das amostras de rejeito oriundas da barragem, caracterização das amostras, de forma a conhecer as características químicas, físicas e mineralógicas e a realização de ensaios de concentração magnética em laboratório, para obtenção de melhor recuperação mássica em detrimento da maior redução de alumina do concentrado, visando garantir a especificação proposta pelo setor de pelotização. A caracterização mineralógica apresentou um material composto principalmente de hematita compactas como portador de Fe e os principais contaminantes são  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , P,  $\text{SiO}_2$ , Mn,  $\text{TiO}_2$ , tendo como destaque a distribuição de 50% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na fração passante em 0,010mm, sendo originada basicamente pelos minerais caulinita, gibbsita e em menor proporção a goethita. Os testes realizados mostraram que o melhor resultado para a combinação entre a redução de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e a maior recuperação mássica do concentrado foi encontrado a partir do percentual de sólidos de 43,75% na alimentação da concentração magnética, campo magnético de 11.170 Gauss, gap de 1,5mm, sem o uso da água de médio e o direcionamento do médio para o rejeito, provendo um concentrado com 66% Fe, 1,35% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 56% de recuperação mássica.

**Palavras-chave:** Barragem rejeito. Concentração magnética. Dragagem. Minério de ferro.

**Fase da Cadeia:** Usina.

## ABSTRACT

Given the challenges and prospects related to sustainability in the mining sector, and considering its relevance to economic development, it is essential to adopt responsible mining practices aimed at reducing and mitigating the impacts of these activities. In this way, sustainability emerges as a fundamental approach to dealing with these challenges in the mining sector, which include the adoption of cleaner and more efficient technologies, the responsible use of water resources, the recovery of degraded areas, the proper treatment of tailings and the promotion of fair and transparent relations with affected communities. For this reason, the aim of this work is to provide greater knowledge about the characteristics of the Gelado's dam, which belongs to Vale and is in the Carajás mountain range, and to benefit it via magnetic concentration to serve the pelletizing sector. This work therefore involved collecting samples of tailings from the dam, characterizing the samples in order to find out their chemical, physical and mineralogical characteristics and carrying out magnetic concentration tests in the laboratory, in order to obtain better mass recovery to the detriment of the greater reduction of alumina in the concentrate, with the aim of guaranteeing the specification proposed by the pelletizing sector. The mineralogical characterization showed a material composed mainly of compact hematite as the Fe carrier and the main contaminants are  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , P,  $\text{SiO}_2$ , Mn,  $\text{TiO}_2$ , with the highlight being the 50% distribution of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in the fraction passing through at 0.010mm, originating basically from the mineral's kaolinite, gibbsite and to a lesser extent goethite. The tests carried out showed that the best result for the combination of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  reduction and the highest mass recovery of the concentrate was found with a solids percentage of 43.75% in the magnetic concentration feed, a magnetic field of 11,170 Gauss, a gap of 1.5mm, without using medium water and directing the medium to the tailings, providing a concentrate with 66% Fe, 1.35%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and 56% mass recovery.

**Keywords:** Tailings dam. Magnetic concentration. Dredging. Iron ore.

**Chain Phase:** Beneficiation Plant.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização geográfica do Projeto Carajás, Corredor Norte. ....	17
Figura 2: Pouso nas primeiras clareiras de Carajás identificadas pelo Geólogo Breno dos Santos. ....	18
Figura 3: O geólogo Breno Augusto dos Santos no local da descoberta na época e anos depois na clareira N3.....	18
Figura 4: Fluxograma simplificado do processo de beneficiamento do minério de ferro – Complexo de Carajás.....	19
Figura 5: Projeto Gelado – Complexo Carajás.....	20
Figura 6: Visão geral da área do projeto da barragem do Gelado ano 1984. ....	20
Figura 7: Fotografia Aérea – Barragem do Gelado. ....	21
Figura 8: Vista aérea das áreas sondadas em 2001 e 2010 – Barragem do Gelado.....	22
Figura 9: Distribuição e coordenadas dos furos de sondagem em 2001 e 2010 – Barragem do Gelado.....	22
Figura 10: Distribuição e profundidade dos furos de sondagem em 2001 e 2010 – Barragem do Gelado.....	23
Figura 11: Furos de sondagem realizados em 2017 para a composição das amostras para caracterização – Barragem do Gelado. ....	25
Figura 12: Fotomicrografias por faixas granulométricas – Furos de sondagem da Barragem do Gelado em 2017.....	27
Figura 13: Layout da rota de processo de recuperação de finos – Barragem do Gelado. ....	30
Figura 14: Dragas Elétricas. ....	31
Figura 15: PF da Barragem Gelado para São Luis – Layout – Draga Elétrica.....	33
Figura 16: Fluxograma Pelotização.....	36
Figura 17: Aglomerado de Pelotas. ....	37
Figura 18: Linhas de campo magnético.....	41
Figura 19: Campo magnético homogêneo (a) e convergente (b) ....	42
Figura 20: Reprodução esquemática do processo de separação magnética.....	44
Figura 21: Indução magnética para diferentes espécies mineralógicas. a) ferromagnéticas, b) paramagnéticas e c) diamagnéticas.....	45
Figura 22: Desenho esquemático de um concentrador magnético de tambor. ....	46
Figura 23: Vista lateral e superior de um separador magnético de carrossel. ....	46

Figura 24: Matrizes dentro do separador magnético de carrossel. ....	47
Figura 25: Representação esquemática do separador de alta intensidade. ....	47
Figura 26: Rapid determination of non-Newtonian flow behaviour in mineral suspensions...51	51
Figura 27: Fluxograma da distribuição das amostras – Barragem do Gelado.....	53
Figura 28: Divisores rotativos. ....	54
Figura 29: Etapas de preparação inicial das amostras. ....	55
Figura 30: Peneirador suspenso (série micro) e Mastersizer 2000.....	56
Figura 31: Amostras Tais quais recebidas. ....	60
Figura 32: Imagens digitais dos minerais – QEMSCAN. ....	64
Figura 33: Tipos de liberação por classe. ....	68
Figura 34: Gráfico do espectro de liberação da gibbsita e caulinita.....	69
Figura 35: Espectro de Liberação da gibbsita. ....	69
Figura 36: Espectro de Liberação da caulinita. ....	70
Figura 37: Gráfico da correlação entre os elementos químicos obtidos via laboratório e QEMSCAN.....	71
Figura 38: Gráfico da distribuição da Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – Concentração magnética, gap 1,5mm - Global. ....	74
Figura 39: Gráfico da distribuição da Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – Concentração magnética, gap 3,8mm - Global. ....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cálculo dos volumes de finos de minério depositado na Barragem do Gelado .....	24
Tabela 2 - Análise química global do material da Barragem do Gelado (Furos de sondagem em 2001 e 2010) .....	24
Tabela 3 - Análise granulométrica da Barragem do Gelado (Furos de sondagem em 2001 e 2010).....	25
Tabela 4 - Distribuição granulométrica – Furos de sondagem da Barragem do Gelado em 2017– Global .....	26
Tabela 5 - Análise química – Furos de sondagem da Barragem do Gelado em 2017– Global	26
Tabela 6 – Análise mineralógica quantitativa – Furos de sondagem da Barragem do Gelado em 2017– Global .....	26
Tabela 7 - Distribuição química por mineral – Furos de sondagem da Barragem do Gelado em 2017– Global .....	27
Tabela 8 - Detalhamento – Draga Elétrica .....	34
Tabela 09 - Análise química por faixa.....	61
Tabela 10 - Distribuição de $Al_2O_3$ nas frações .....	61
Tabela 11 - Distribuição granulométrica e superfície específica .....	62
Tabela 12 - Quantificação mineralógica - QEMSCAN.....	63
Tabela 13 - Quantificação mineralógica via microscopia ótica – Caracterização de 2004.....	65
Tabela 14 - Distribuição da $Al_2O_3$ nos minerais – QEMSCAN.....	65
Tabela 15 - Percentual em massa dos elementos químicos por mineral .....	66
Tabela 16 - Difração de raios X por faixa – Método de <i>Rietveld</i> .....	67
Tabela 17 - Distribuição dos minerais portadores de $Al_2O_3$ – Correlação entre o teor de $Al_2O_3$ e os minerais aluminosos – QEMSCAN. ....	67
Tabela 18 - Espectro de Liberação da gibbsita e caulinita. ....	68
Tabela 20 – Teste da redução de $Al_2O_3$ via concentração magnética – Referência de concentrado, médio e rejeito.....	73

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM – American Society for Testing and Materials

CDM – Centro de Desenvolvimento Mineral - Vale

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CPT – Centro de Pesquisas Tecnológicas - Vale

DS – Desenvolvimento Sustentável

EDS – Espectroscopia de energia dispersiva

ITV – Instituto Tecnológico Vale

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

GPV – Sistema de produção Vale

PMC – Província Mineral de Carajás

PF – Pellet Feed

PPC – Perda Por Calcinação

RM – Recuperação Mássica

WD – Wet Drum

WDRE – Wet Drum Rare Earth

WHIMS – Wet High Intensity Magnetic Separator

$\mu\text{m}$  – Micrometros

Blaine – Área superficial específica das partículas ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ), determinada em um permeabilímetro de Blaine

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>SERRA DOS CARAJÁS .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Barragem do gelado .....</b>	<b>19</b>
2.1.1	Reserva da barragem do gelado .....	21
2.1.2	Qualidade das amostras dos furos de sondagem da barragem do gelado .....	24
2.1.3	Caracterização das amostras dos furos de sondagens na barragem do gelado .....	25
<b>3</b>	<b>DRAGAGEM.....</b>	<b>29</b>
3.1.1	Draga elétrica .....	30
<b>4</b>	<b>PELOTIZAÇÃO .....</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>38</b>
<b>5.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>38</b>
<b>5.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>38</b>
<b>6</b>	<b>JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>40</b>
<b>7.1</b>	<b>Magnetismo .....</b>	<b>40</b>
<b>7.2</b>	<b>Separação magnética .....</b>	<b>41</b>
<b>7.3</b>	<b>Amostragem .....</b>	<b>48</b>
<b>7.4</b>	<b>Caracterização de polpa .....</b>	<b>50</b>
<b>8</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>53</b>
<b>8.1</b>	<b>Preparação inicial das amostras .....</b>	<b>53</b>
<b>8.2</b>	<b>Análise granulométrica .....</b>	<b>55</b>
<b>8.3</b>	<b>Caracterização mineralógica por microscopia eletrônica automatizada .....</b>	<b>56</b>
<b>8.4</b>	<b>Área superficial específica.....</b>	<b>57</b>
<b>8.5</b>	<b>Densidade real .....</b>	<b>58</b>
<b>8.6</b>	<b>Concentração magnética .....</b>	<b>58</b>
<b>8.7</b>	<b>Difração de raios X .....</b>	<b>58</b>
<b>8.8</b>	<b>Análise química .....</b>	<b>59</b>
<b>9</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>60</b>
<b>9.1</b>	<b>Caraterização inicial.....</b>	<b>60</b>

<b>9.2</b>	<b>Simulação de redução de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aplicando um corte perfeito em 0,106mm, 0,019mm e 0,010mm .....</b>	<b>71</b>
<b>9.3</b>	<b>Teste piloto de concentração magnética .....</b>	<b>72</b>
<b>10</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>76</b>
<b>11</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>78</b>
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>84</b>
	<b>APÊNDICE 1 – Metodologia de Análise Mineralógica via QEMSCAN .....</b>	<b>85</b>
	<b>APÊNDICE 2 – Concentrador Magnético Micromag (GAUSTEC) .....</b>	<b>93</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>96</b>
	<b>ANEXO 1 – Difração de Raio X .....</b>	<b>97</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O cenário global econômico tem sido desafiador e cada vez mais tem exigido que a empresas se relacionem com o meio ao qual se inserem, pelos usos de métodos adequados de forma a torná-la sustentável e uso de tecnologias inovadoras que possam reduzir impactos negativos de qualquer natureza.

A empresas mineradoras tem papel relevante como agente de transformação desta nova tendência mundial, pois através dos meios de beneficiamento do mineral pretendido, pode ajustar os processos para que se obtenha produção com maiores teores de qualidade, gerando menor disposição de rejeito, principalmente quando se usa a disposição em barragens. Na mesma ordem, leva-se em consideração o esgotamento das reservas minerais com elevados teores, neste caso, o foco está nas reservas de minério de ferro, que cada vez mais tem diminuído em quantidade e teores, sendo necessário reavaliar as rotas de processo, a fim de se obter a maximização dos ativos pela maior capacidade de beneficiar as faixas granulométricas mais finas que são geradas ao longo da cadeia produtiva e que tem em sua composição, teores de minério de ferro que podem ser incorporados ao produto, mas que em sua maioria continuam seguindo para as barragens de rejeito.

Na região amazônica do norte do Brasil, no sudeste do Pará, encontra-se a Província Mineral de Carajás (PMC), situada nas mediações da Floresta Nacional de Carajás, que tem clima predominantemente tropical chuvoso, tendo sua maior parte coberta por florestas. A extensão da Serra dos Carajás é de aproximadamente 1 milhão de quilômetros quadrados, a rica região mineral abrange o sudeste do Estado do Pará, o oeste do Maranhão e o norte do Tocantins.

AMAZÔNIA A Amazonia, mais que nunca, é assunto obrigatório não só no Brasil e nos demais países vizinhos, mas também nos centros mundiais onde há pessoas e grupos com interesses diversos, desde econômicos a puramente ecológicos, e que, de uma forma ou de outra, procuram participar ou contribuir para a sua preservação, seu desenvolvimento ou simplesmente sua exploração. (SANTOS, 1981, prefácio).

A Serra dos Carajás é certamente a maior província mineral do planeta.

## 2 SERRA DOS CARAJÁS

A Serra dos Carajás abriga a maior jazida de minério de ferro explorada do mundo. Além de ferro, ela concentra grande quantidade de manganês, cobre, ouro, prata, bauxita, níquel, cromo, estanho, zinco e tungstênio. Com aproximadamente 350km no sentido Leste-Oeste, incorpora diversos municípios, como Parauapebas, Canaã dos Carajás, Curionópolis, Eldorado dos Carajás, Marabá e São Félix do Xingu.

Figura 1: Localização geográfica do Projeto Carajás, Corredor Norte.



Fonte: Manual de Britagens (Operações Carajás – Corredor Norte) – Vale (2020).

Foi em 1967, que o helicóptero onde estava o geólogo Breno Augusto dos Santos fez um pouso de abastecimento em uma clareira da Serra Arqueada, no sudeste do Pará. A ideia inicial era procurar manganês, mas o que foi encontrado mudou a história da Vale e do Brasil, e colocou o país no mapa da mineração mundial.

O geólogo desceu para examinar algumas rochas do local: "quando bati o martelo, saiu um negócio avermelhado e vi que não era manganês, era ferro. Pensei 'caramba, isso tudo aqui é ferro". Breno era chefe da equipe de geólogos da US Steel, siderúrgica norte-americana, que na época procurava manganês na Amazônia para abastecer suas usinas nos Estados Unidos. A equipe era formada também pelos geólogos Erasto de Almeida e João Ritter.

Figura 2: Pouso nas primeiras clareiras de Carajás identificadas pelo Geólogo Breno dos Santos.



Fonte: Manual de Britagens (Operações Carajás – Corredor Norte) – Vale (2020).

Figura 3: O geólogo Breno Augusto dos Santos no local da descoberta na época e anos depois na clareira N3.



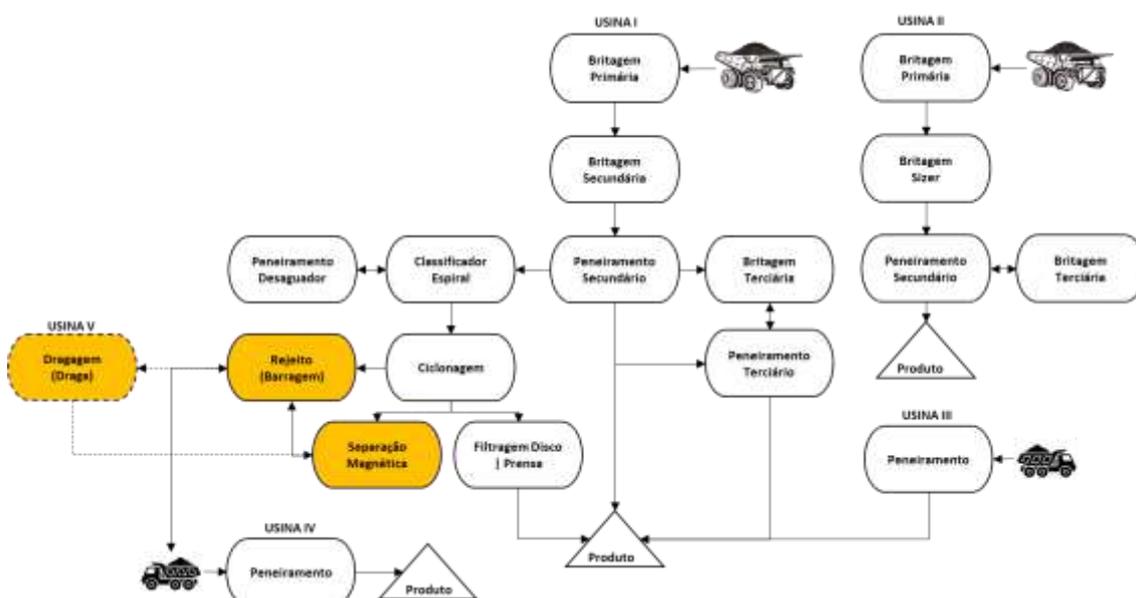
Fonte: Manual de Britagens (Operações Carajás – Corredor Norte) – Vale (2020).

Somente o Complexo de Carajás, sistema Serra Norte, que teve início da lavra a partir de 1985, é possível produzir aproximadamente 130 milhões de toneladas de minério de ferro anualmente.

O minério de Carajás foi ocupando um espaço importante no mercado mundial, dada a sua qualidade, que possibilita o *blend* (mistura) com outros minérios mais pobres e a redução da emissão de poluentes na indústria siderúrgica.

A figura 4 apresenta o fluxograma esquemático básico das etapas do processo das usinas de beneficiamento do Complexo de Carajás, responsável pela geração dos rejeitos que são dispostos nas barragens.

Figura 4: Fluxograma simplificado do processo de beneficiamento do minério de ferro – Complexo de Carajás.

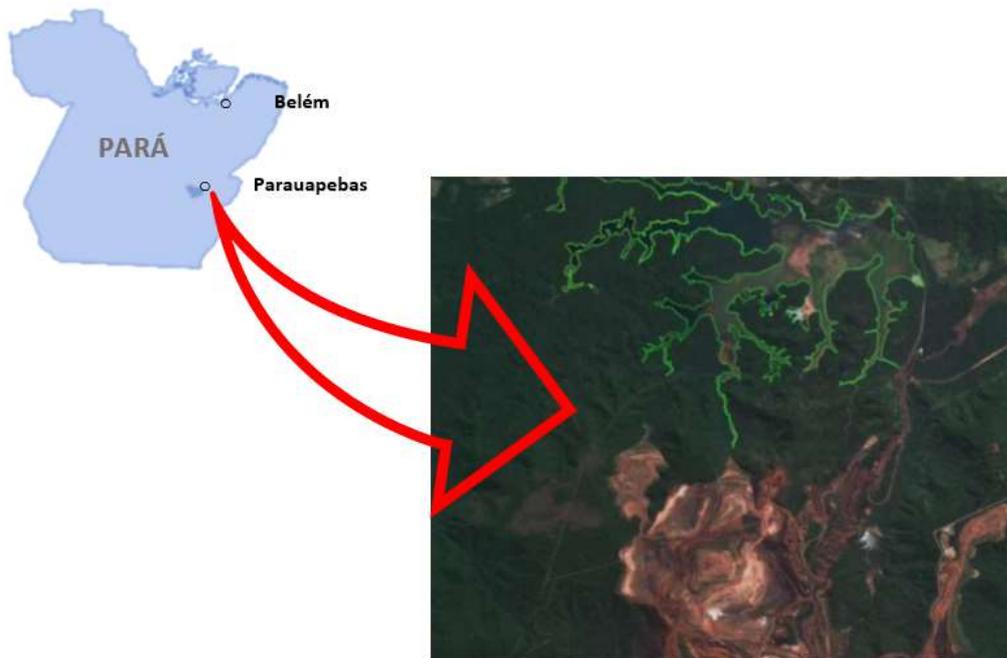


Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2023).

## 2.1 Barragem do Gelado

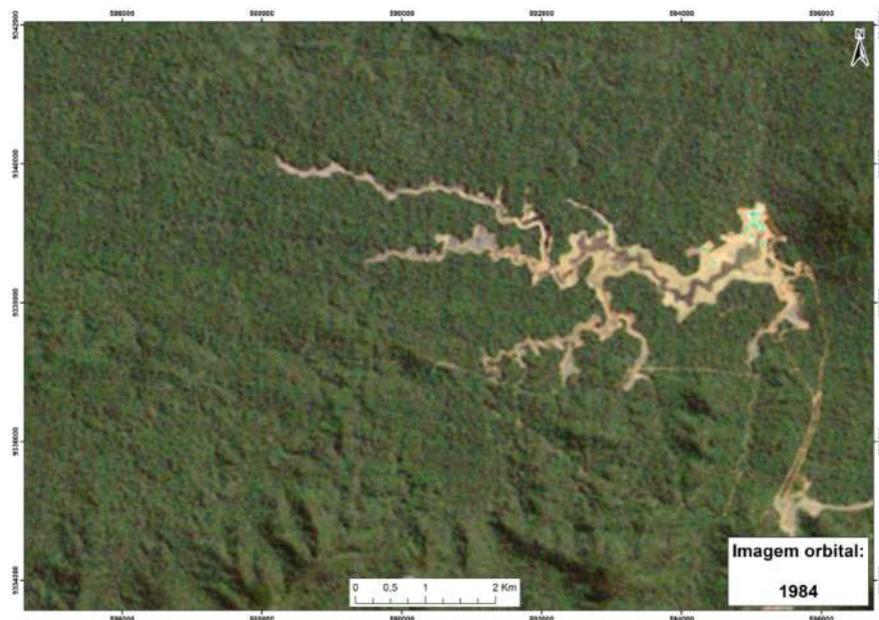
A Barragem do Gelado, localizada na Mina de Serra Norte, conforme figuras 5, 6 e 7, com as coordenadas geográficas 5°58'45.398"S e 50°08'29.198"W ou 595.023 (X) e 9.339.012 (Y) do fuso 22M e Datum SIRGAS 2000. Sua concepção visa o atendimento à regularização das vazões para abastecimento de águas para as usinas de beneficiamento de minério de ferro, a contenção de toda a produção de rejeitos oriundos do processo de beneficiamento das minas do Complexo Carajás e contenção de sedimentos das pilhas de estéril.

Figura 5: Projeto Gelado – Complexo Carajás.



Fonte: Vale (2022).

Figura 6: Visão geral da área do projeto da barragem do Gelado ano 1984.



Fonte: Plano de Recuperação de Rejeito na Barragem do Gelado N5593 – RL-1830KN-U-00009 - Vale (2022).

A Barragem iniciou sua operação em 20/12/1985, com base no projeto elaborado pela MILDER KAISER (1983-1985) e já foi alteada duas vezes pelo método de jusante, seguindo o projeto elaborado pela empresa ISMAR FERRARI, sendo que o primeiro alteamento ocorreu em 1995 e o último ocorreu em 2002/2003.

O reservatório possui uma área extensa de cerca de 13,4 km<sup>2</sup>, com um perímetro de aproximadamente 123,0km, um volume ocupado (rejeito + água) de aproximadamente 141 milhões de metros cúbicos.

Figura 7: Fotografia Aérea – Barragem do Gelado.

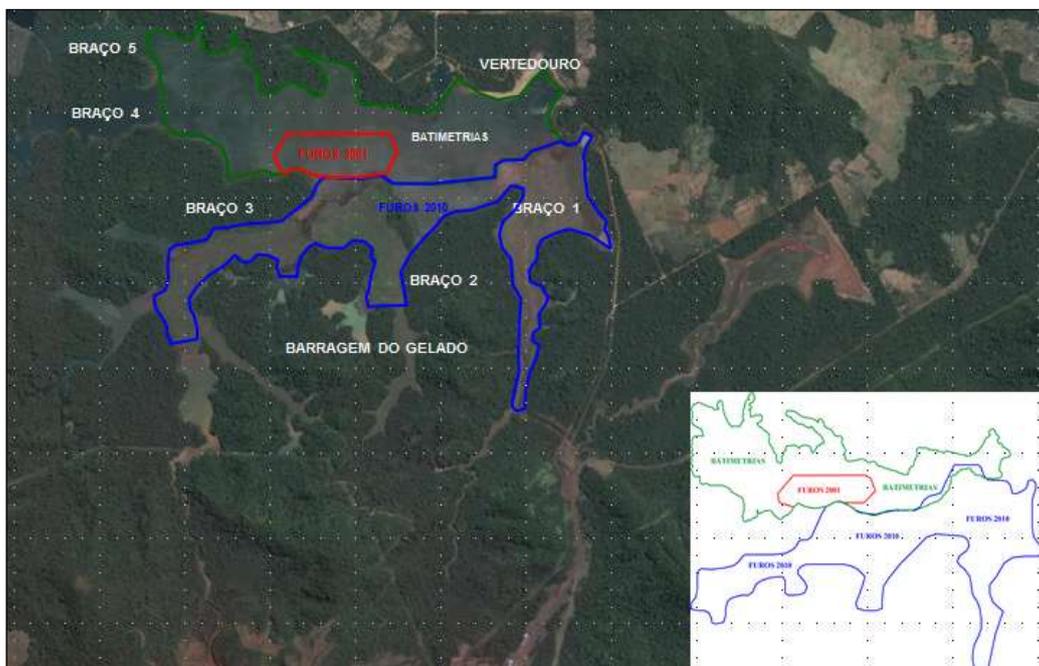


Fonte: Vale (2022).

### 2.1.1 Reserva da barragem do gelado

A barragem do gelado foi sondada em duas épocas distintas, em 2001 e 2010 conforme ilustrado na figura abaixo.

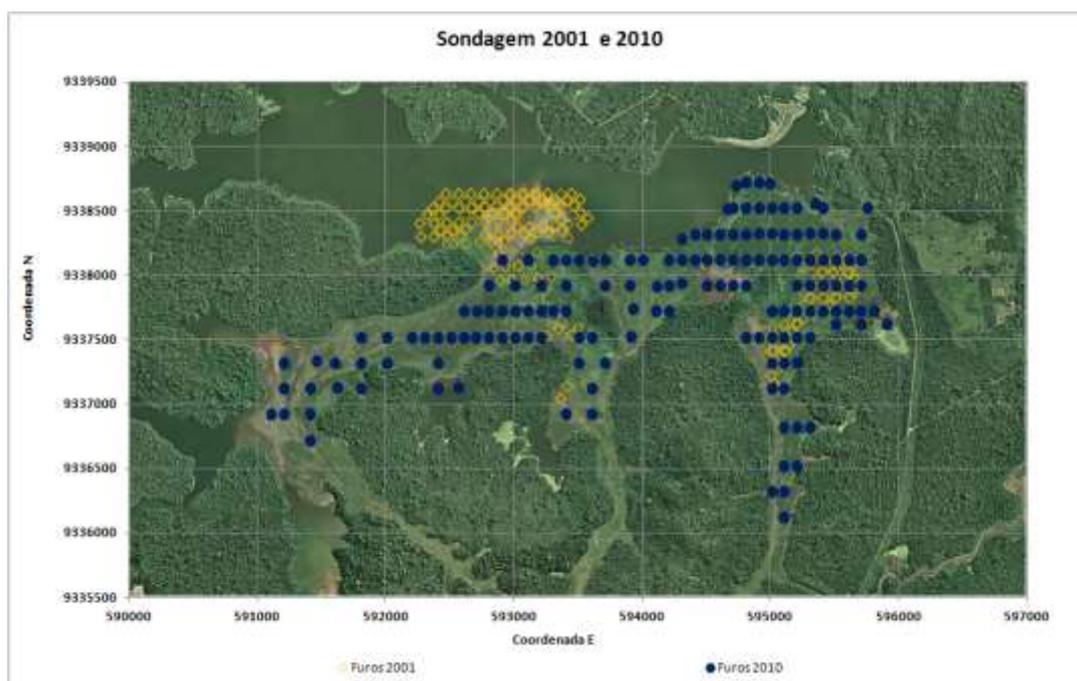
Figura 8: Vista aérea das áreas sondadas em 2011 e 2010 – Barragem do Gelado.



Fonte: Relatório da empresa Braga Geo, contratada pela Vale (2011).

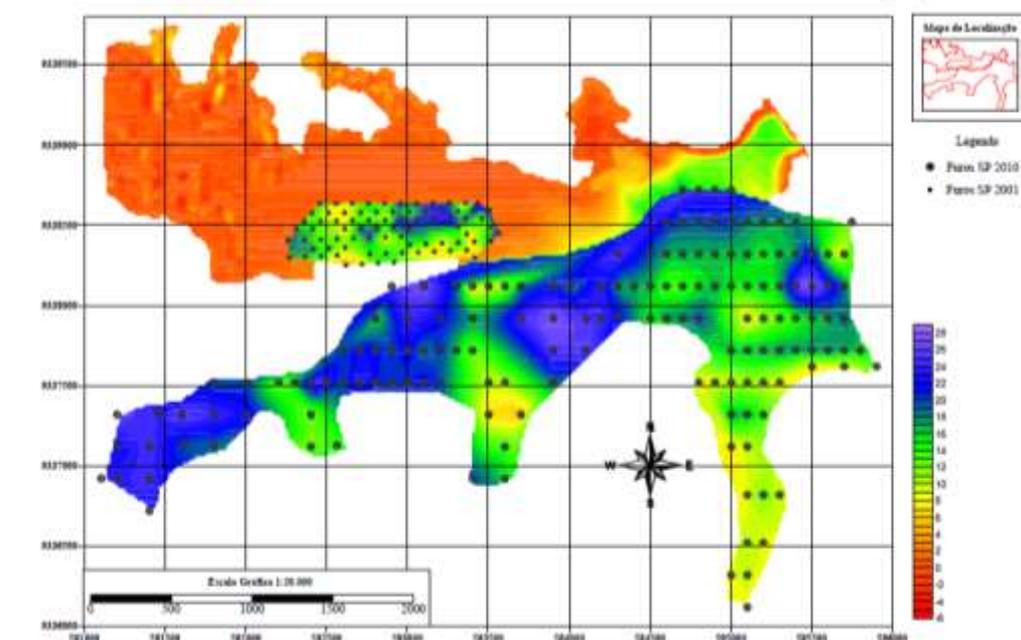
A Figura abaixo mostra os mapas com as áreas, profundidades e volumes calculados de todo o depósito.

Figura 9: Distribuição e coordenadas dos furos de sondagem em 2011 e 2010 – Barragem do Gelado.



Fonte: Vale (2018).

Figura 10: Distribuição e profundidade dos furos de sondagem em 2001 e 2010 – Barragem do Gelado.



Fonte: Relatório da empresa Braga Geo, contratada pela Vale (2011).

A partir do cálculo de volume de rejeito contido na barragem do Gelado, encontrou-se através da modelagem com 2 diferentes *softwares* (*Surfer® Golden Software e MapInfo® Pitney Bowes*) o volume aproximado de 80 milhões de metros

cúbicos. A quase totalidade desse volume (~97%) está compreendida em uma profundidade máxima de 20 metros.

**Tabela 1 - Cálculo dos volumes de finos de minério depositado na Barragem do Gelado**

	Surfer	MapInfo
Batimetrias	8.001.466 m <sup>3</sup>	8.927.193 m <sup>3</sup>
Furos SPT 2001	5.854.521 m <sup>3</sup>	6.739.267 m <sup>3</sup>
Furos SPT 2010	65.778.441 m <sup>3</sup>	68.883.933 m <sup>3</sup>
Total	79.634.420 m <sup>3</sup>	84.550.393 m <sup>3</sup>

Fonte: Relatório da empresa Braga Geo, contratada pela Vale (2011).

Considerando a densidade média do depósito in situ de 2,5t/m<sup>3</sup>, calcula-se que a barragem do gelado possui uma reserva de aproximadamente 200 milhões de toneladas de finos de minério contido. Desse total, estima-se que 140 milhões de toneladas (70%) é viável de recuperação por dragagem.

### 2.1.2 Qualidade das amostras dos furos de sondagem da barragem do gelado

A qualidade química obtida no banco de dados dos furos de sondagem é mostrada na Tabela abaixo. Observa-se que a média do teor de ferro é de 63,4% e os principais contaminantes são sílica e alumina.

**Tabela 2 - Análise química global do material da Barragem do Gelado (Furos de sondagem em 2001 e 2010)**

Amostra	Local	Volume (m <sup>3</sup> )	Densidade (m <sup>3</sup> )	Massa (t)	Química Global					
					Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	PPC
Sondagem 2001	Braço 1	-	-	-	64,72	1,20	0,062	2,042	0,907	-
	Braço 2	-	-	-	65,12	1,09	0,069	1,865	0,820	-
	Subtotal	6.739.267	2,50	16.848.168	64,92	1,15	0,066	1,954	0,864	-
Sondagem 2010	Braço 1	31.400.000	2,50	78.500.000	63,09	2,99	0,046	2,666	0,713	2,85
	Braço 2	23.424.000	2,50	58.560.000	63,26	2,50	0,050	2,486	0,902	3,05
	Braço 3	15.350.000	2,50	38.375.000	63,45	2,25	0,052	2,469	0,901	2,98
	Subtotal	70.174.000	2,50	175.435.000	63,22	2,66	0,049	2,563	0,817	2,95
<b>Total</b>	<b>76.913.267</b>	<b>2,50</b>	<b>192.283.168</b>	<b>63,37</b>	<b>2,53</b>	<b>0,050</b>	<b>2,510</b>	<b>0,812</b>	<b>2,95</b>	

Fonte: RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

Observa-se na tabela 3 abaixo que, aproximadamente, 82% do material está contido na fração abaixo de 0,045mm.

**Tabela 3 - Análise granulométrica da Barragem do Gelado (Furos de sondagem em 2001 e 2010)**

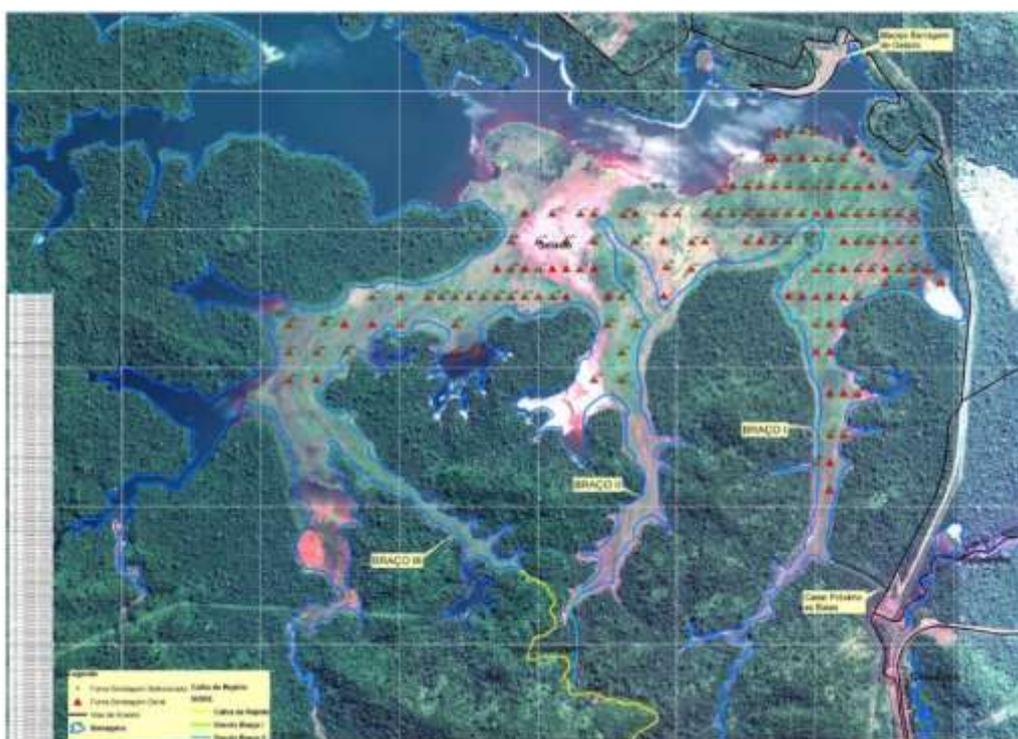
Amostra	Local	Volume (m³)	Densidade (m³)	Massa (t)	Análise granulométrica						
					+0,25mm	+0,15mm	+0,106mm	+0,075mm	+0,045mm	-0,045mm	-0,020mm
Sondagem 2001	Braço 1	-	-	-	-	-	-	-	-	78,45	58,70
	Braço 2	-	-	-	-	-	-	-	-	67,86	55,89
	Subtotal	6.739.267	2,50	16.848.168	-	-	-	-	-	73,16	57,29
Sondagem 2010	Braço 1	31.400.000	2,50	78.500.000	1,36	1,440	2,490	6,370	10,18	78,16	-
	Braço 2	23.424.000	2,50	58.560.000	1,42	1,720	2,400	3,330	5,38	85,76	-
	Braço 3	15.350.000	2,50	38.375.000	0,34	0,510	1,230	3,140	6,65	88,14	-
	Subtotal	70.174.000	2,50	175.435.000	1,16	1,330	2,180	4,650	7,81	82,88	-
<b>Total</b>	<b>76.913.267</b>	<b>2,50</b>	<b>192.283.168</b>	<b>1,16</b>	<b>1,330</b>	<b>2,180</b>	<b>4,650</b>	<b>7,81</b>	<b>82,03</b>	<b>-</b>	

Fonte: RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

### 2.1.3 Caracterização das amostras dos furos de sondagens na barragem do gelado

No ano de 2017 foram realizados novos furos de sondagem na barragem do gelado, com o intuito de se obter um maior entendimento do perfil mineral em faixas granulométricas diferentes. O posicionamento dos furos de sondagem em 2017 foi baseado nas amostragens realizadas no ano de 2010.

Figura 11: Furos de sondagem realizados em 2017 para a composição das amostras para caracterização – Barragem do Gelado.



Fonte: RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

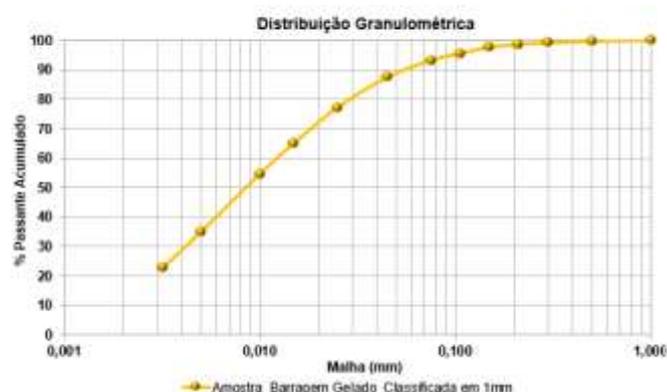
As amostras de todos os furos de sondagem em 2017, foram usadas na composição de uma amostra composta.

Os resultados das análises químicas, granulométricas e mineralógicas foram obtidos a partir dos métodos abaixo:

- Análise Química: fluorescência de raios X;
- Análise Granulométrica: peneiramento a úmido até a malha de 0,045mm;
- Difração a laser: Granulômetro Malvern Mastersizer para o material passante em 0,045mm;
- Análise Mineralógica: microscopia ótica de luz refletida (microscópio Leica DM6000).

**Tabela 4 - Distribuição granulométrica – Furos de sondagem da Barragem do Gelado em 2017– Global**

Malha (mm)	Distribuição Granulométrica (%)		
	Retido Simples	Retido Acumulado	Passante Acumulado
1,000	0,00	0,00	100,00
0,500	0,40	0,40	99,60
0,300	0,40	0,95	99,05
0,210	0,50	1,44	98,56
0,150	0,85	2,39	97,61
0,100	2,09	4,48	95,52
0,075	2,42	6,90	93,10
0,045	5,88	12,58	87,42
0,025	7,52	22,87	77,13
0,015	12,06	34,92	65,08
0,010	10,67	45,59	54,41
0,005	5,20	65,21	34,79
0,003	5,89	77,30	22,70
0,003	22,70	100,00	0,00
Total	100,00		



Fonte: RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

**Tabela 5 - Análise química – Furos de sondagem da Barragem do Gelado em 2017– Global**

Amostra	Química (%)								
	Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	PPC
Barragem Gelado	62,77	3,02	0,048	2,70	0,701	0,199	0,020	0,052	3,03

Fonte: RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

**Tabela 6 – Análise mineralógica quantitativa – Furos de sondagem da Barragem do Gelado em 2017– Global**

Amostra	Quantificação Mineralógica (%)														
	HE	HL	HG	Hmic	HS	HC	HM	MA	GO	GT	OZ	MN	CA	GB	OT
Barragem Gelado	1,41	4,69	14,13	10,19	43,64	74,06	0,07	0,41	15,76	3,35	2,45	0,28	0,01	3,19	0,42

HE = Hematita Especular  
 HL = Hematita Lamelar  
 HG = Hematita Granular  
 Hmic = Hematita Microcristalina  
 HS = Hematita Sinuosa  
 HC's = Hematitas compactas  
 HM = Hematita martítica  
 MA = Magnetita  
 GO = Goethita  
 GT = Goethita terrosa  
 OZ = Quartzo  
 MN = Óxido de manganês  
 CA = Caulinita  
 GB = Gibbsita  
 OT = Outros minerais

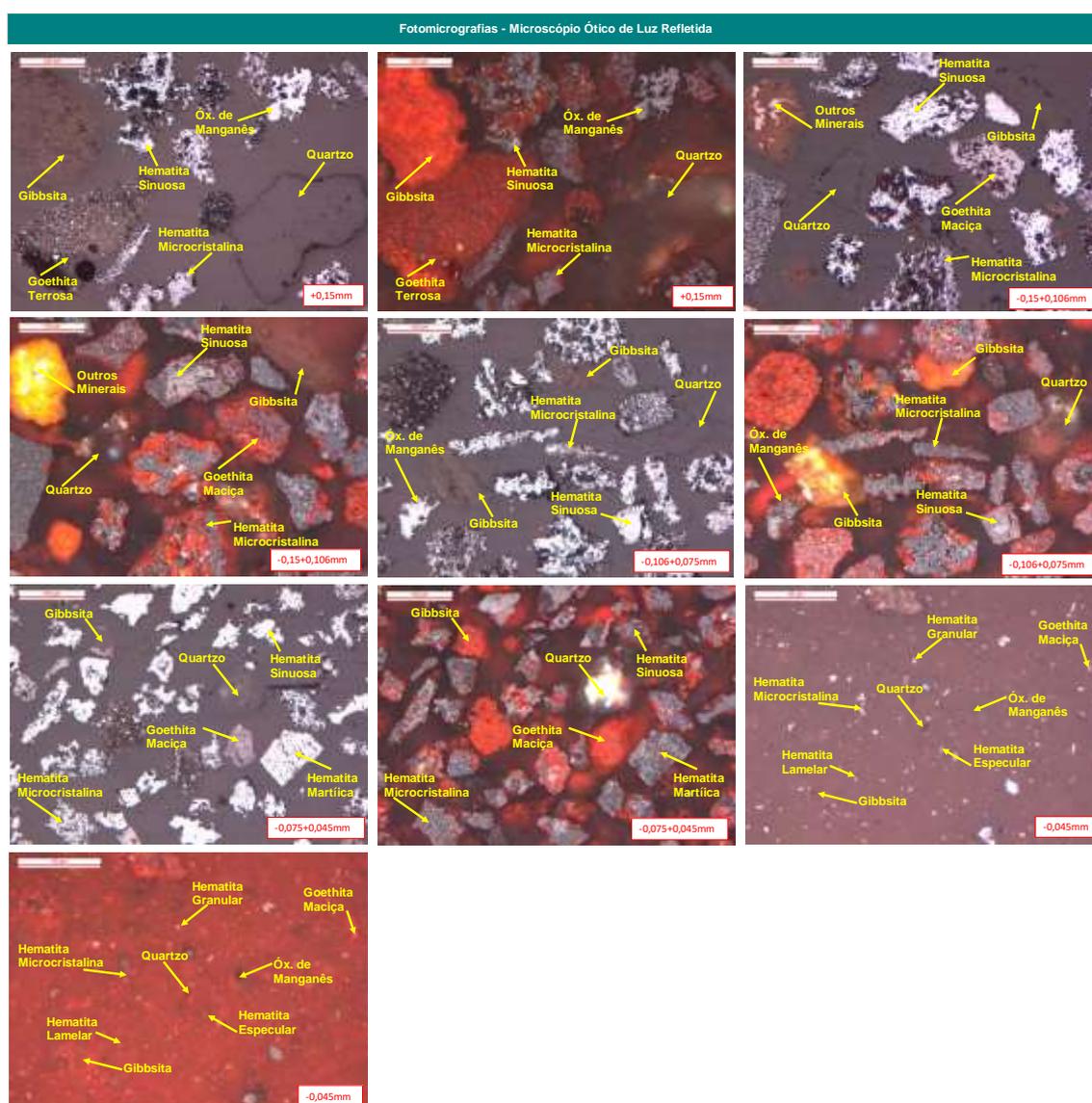
Fonte: RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

**Tabela 7 - Distribuição química por mineral – Furos de sondagem da Barragem do Gelado em 2017– Global**

Amostra	Fração (mm)	Retido Simples (%)	Análise Química (%)		Distribuição Química por Mineral (%)						
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>				Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
					Quartzo Livre	Quartzo Misto	Goethita Terrosa	Caulinita	Goethita Terrosa	Caulinita	Gibbsita
Barragem Gelado	+0,150	0,91	17,51	8,89	90,81	7,04	1,01	1,14	4,34	2,20	93,37
	-0,150 +0,106	1,73	8,51	5,89	94,59	4,57	0,84	0,00	3,42	0,00	96,58
	-0,106 +0,075	4,37	4,88	3,46	92,05	7,04	0,63	0,27	2,13	0,42	97,44
	-0,075 +0,045	10,08	2,66	2,17	98,58	0,00	0,00	1,42	0,00	4,56	95,44
	-0,045	82,01	2,76	2,52	92,97	0,00	7,03	0,00	11,01	0,00	68,99
<b>Global</b>	<b>100,00</b>	<b>3,02</b>	<b>2,70</b>	<b>93,53</b>	<b>1,21</b>	<b>5,00</b>	<b>0,26</b>	<b>9,85</b>	<b>0,24</b>	<b>89,91</b>	

Fonte: RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

Figura 12: Fotomicrografias por faixas granulométricas – Furos de sondagem da Barragem do Gelado em 2017.



Fonte: RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

A quantificação mineralógica indica que os principais minerais portadores de Fe são as hematitas compactas. O  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tem como principal portador a gibbsita, que predomina nas frações mais grossas, decrescendo até a fração +0,045mm. Quartzo, gibbsita e caulinita são os principais minerais contaminantes. A  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , concentra-se principalmente nas frações acima de 0,106mm, decrescendo até a faixa de +0,045mm. Comportamento similar é observado para os elementos P,  $\text{SiO}_2$ , Mn e  $\text{TiO}_2$ . Os deletérios CaO e MgO não são significativos.

### 3 DRAGAGEM

A dragagem é o processo de remoção de sedimentos, detritos e materiais indesejados do fundo de corpos d'água, como rios, lagos, portos e canais, para melhorar a navegabilidade, a capacidade de armazenamento de água ou para a construção e manutenção de infraestruturas costeiras.

Segundo a CNT (2006), mais de 90% do comércio internacional passa por via marítima, o que demonstra a tamanha relevância da necessidade de garantias navegais em canais estratégicos e rios, de forma a contribuir no desenvolvimento socioeconômico mundial.

A dragagem um papel crucial na manutenção da navegabilidade de vias fluviais e portos, bem como na restauração de praias e ecossistemas costeiros (SUTHERLAND e FREITAS, 2008).

Existem diferentes razões para realizar a dragagem. Em portos e canais, por exemplo, a dragagem é frequentemente necessária para manter profundidades adequadas para a navegação, especialmente quando há acúmulo de sedimentos ou deposição de material dragado de forma natural. Nos rios e lagos, a dragagem pode ser necessária para melhorar a qualidade da água, remover contaminantes ou restaurar habitats naturais.

De acordo Krontiris e Mulligan (2020), a dragagem, mesmo que essencial para várias aplicações, apresenta desafios ambientais significativos. A remoção de sedimentos pode afetar negativamente os ecossistemas aquáticos e os habitats costeiros. Por isso, faz-se necessário que pesquisadores e profissionais da área trabalhem em soluções sustentáveis, a fim de se reutilizar os sedimentos dragados, a mitigação de impactos ambientais e o desenvolvimento de técnicas mais eficientes e ecologicamente conscientes.

Referente ao projeto de dragagem da barragem de Carajás, estima-se uma produção de 10Mtpa (base úmida) de *Pellet Feed* (PF), através de uma rota de processo que compreende operações unitárias localizadas próximas a barragem: dragagem; peneiramento de proteção e classificação; espessamento; tancagem e estação de bombeamento, concentração magnética e filtragem. A polpa obtida no espessador será bombeada por mineroduto, que consiste em 6,73km de extensão, até a usina principal de Carajás.

Figura 13: Layout da rota de processo de recuperação de finos – Barragem do Gelado.



Fonte: MANUAL DE OPERAÇÃO, MANUTENÇÃO E VIGILÂNCIA – RL-MOGLD-001 – Vale (2022).

Esta lavra irá remover o volume de rejeito emerso que ocupa uma área de amortecimento de cheias, ou seja, irá permitir melhorar a condição de segurança hidráulica da estrutura.

### 3.1.1 Draga elétrica

A técnica de dragagem elétrica é menos comum do que as técnicas tradicionais de dragagem, mas pode ser uma alternativa interessante para determinadas situações, pois seu uso tem relação direta com a sustentabilidade do planeta. A utilização de dragas elétricas é um marco no processo de dragagem, pois demonstra o quão conectada está com a redução de impactos ambientais, através da redução de emissão de CO<sub>2</sub>.

Figura 14: Dragas Elétricas.



Fonte: Vista aérea – Barragem do Gelado – Vale (2023).

Conforme Shuman e Comer (2012), A dragagem elétrica é uma técnica inovadora que utiliza correntes elétricas para soltar e transportar sedimentos do fundo de corpos d'água. Esta abordagem oferece benefícios significativos, incluindo a redução da dispersão de sedimentos no ambiente aquático e a minimização dos impactos ambientais.

Para Hjartland e Mjelde (2019), a dragagem elétrica é uma técnica promissora para a remoção de sedimentos contaminados em ambientes aquáticos. Este método tem o potencial de reduzir a disseminação de poluentes durante a dragagem, minimizando os riscos à saúde humana e ao meio ambiente.

A dragagem elétrica também desempenha um papel fundamental na gestão costeira, auxiliando na prevenção do assoreamento de canais de navegação e praias, bem como na restauração de ecossistemas costeiros. Sua importância reside na capacidade de remover sedimentos de maneira controlada e eficaz, contribuindo para a manutenção da infraestrutura costeira, a proteção contra tempestades e a preservação de habitats naturais McGrail e Harnett (2019).

Em termos práticos, uma draga elétrica, opera por sucção, a partir do cortador, sistema de fixação por spuds, cabos de aço e guinchos. Por não ter sistema de propulsão, faz uso um conector elétrico de média tensão capaz de alimentar todos os sistemas da draga.

Para o bombeamento do material desagregado pelo cortador, a draga possui uma bomba submersa instalada na lança. A draga foi projetada para escavar o solo do local de operação e transportar hidráulicamente o material retirado até o destino.

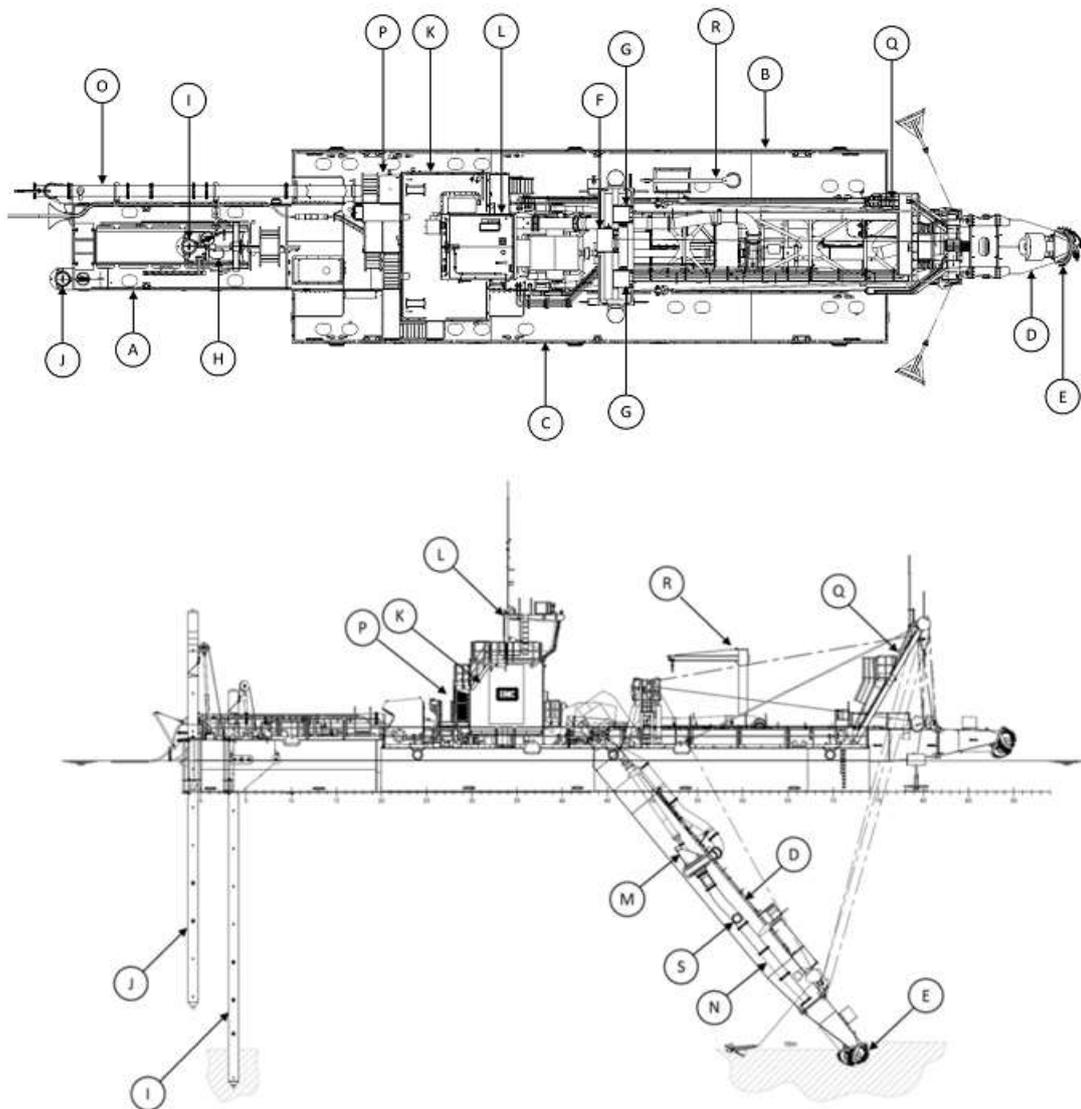
O casco consiste em dois pontões laterais e um pontão central, de montagem e desmontagem simples e rápida. Entre os dois pontões laterais situa-se a lança do cortador. A lança pode ser levantada e abaixada por meio de um guincho hidráulico (guincho de içamento da lança). Ao lado do guincho de içamento da lança, encontram-se dois guinchos de varredura - um do lado de bombordo e outro de boreste, para a movimentação lateral (giro) da draga. Ambos os guinchos estão localizados na plataforma dos guinchos.

A lança abriga o cortador, uma bomba submersa de dragagem e a tubulação de sucção. O cortador é acionado diretamente por um motor hidráulico de baixa velocidade. A bomba de dragagem é acionada diretamente por um motor elétrico localizado acima da linha d'água.

O sistema de spuds, instalado no convés, é composto por duas torres (o de trabalho e o auxiliar) e um carro do spud para movimentação da draga. Cada spud tem um sistema de içamento próprio com uma roldana para guiar os cabos que levantam o spud. Um dos lados do cabo de içamento do spud é fixado em um ponto fixo do casco e o outro é fixado em um engate localizado no spud.

Para uma melhor compreensão, na figura 14 é apresentada uma vista superior e um corte lateral de uma draga elétrica.

Figura 15: PF da Barragem Gelado para São Luis – Layout – Draga Elétrica.



Fonte: MANUAL DO USUÁRIO – N1320 – Vale (2022).

**Tabela 8 - Detalhamento – Draga Elétrica**

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>
A	Pontão central
B	Pontão de bombordo
C	Pontão de boreste
D	Lança
E	Cortador
F	Guincho de içamento da lança
G	Guinchos de varredura
H	Carro do spud
I	Spud de trabalho (Principal)
J	Spud auxiliar
K	Sala elétrica
L	Cabine de operação
M	Bomba de dragagem
N	Tubulação de sucção
O	Tubulação de descarga
P	Banheiro incinerador
Q	Pórtico da lança
R	Guindaste de convés
S	Válvula de alívio de vácuo

Fonte: MANUAL DO USUÁRIO – N1320 – Vale (2022).

## 4 PELOTIZAÇÃO

A pelotização é um processo de aglomeração de minérios em forma de pelotas, geralmente esféricas, que são utilizadas como matéria-prima na indústria siderúrgica. Esse processo é fundamental para a transformação de minérios de ferro de baixa qualidade em produtos mais adequados para a fabricação de aço em altos-fornos.

Pode-se considerar como pelotização, um processo utilizado na indústria de mineração e siderurgia para transformar minérios finos em pelotas. As pelotas são pequenas esferas produzidas a partir de minérios concentrados, como minério de ferro, cobre, níquel, entre outros.

Chaves (2007), considera que a pelotização de minério de ferro é um processo essencial na indústria siderúrgica que visa transformar minérios de baixa qualidade em pellets de alta qualidade. Este processo envolve a mistura do minério de ferro beneficiado com água e aditivos, seguida da moldagem em pequenas esferas que são secas e curadas em fornos de alta temperatura. As pelotas resultantes têm características ideais para uso em altos-fornos e apresentam vantagens significativas, como a melhoria da eficiência energética e a redução das emissões de gases poluentes.

Para Pietsch (1991), a pelotização é o processo que ocorre pela aglomeração de pequenas esferas e a partir do calor (forno), obtém-se o endurecimento destas.

O processo de pelotização envolve diversas etapas. Desde a moagem para reduzir seu tamanho e garantir uma distribuição homogênea das partículas, quanto as adições de ligantes, como bentonita, que atuam como aglomerantes, proporcionando coesão às partículas do minério. Ao atingir a umidade adequada para formar aglomerados, o minério segue para o pelotizador, onde ocorre a formação das pelotas. Nessa etapa, as partículas se aglutinam e adquirem a forma esférica através da ação de forças mecânicas e da rotação do equipamento.

Pietsch (1991), também explica que o processo pelotamento ocorre pela aglomeração de material, em outras palavras, a formação de pelotas cruas, a partir da rotação do material em algum disco, com a adição de algum tipo de aglutinante, as partículas colidem, formando o aglomerado (pelotas).

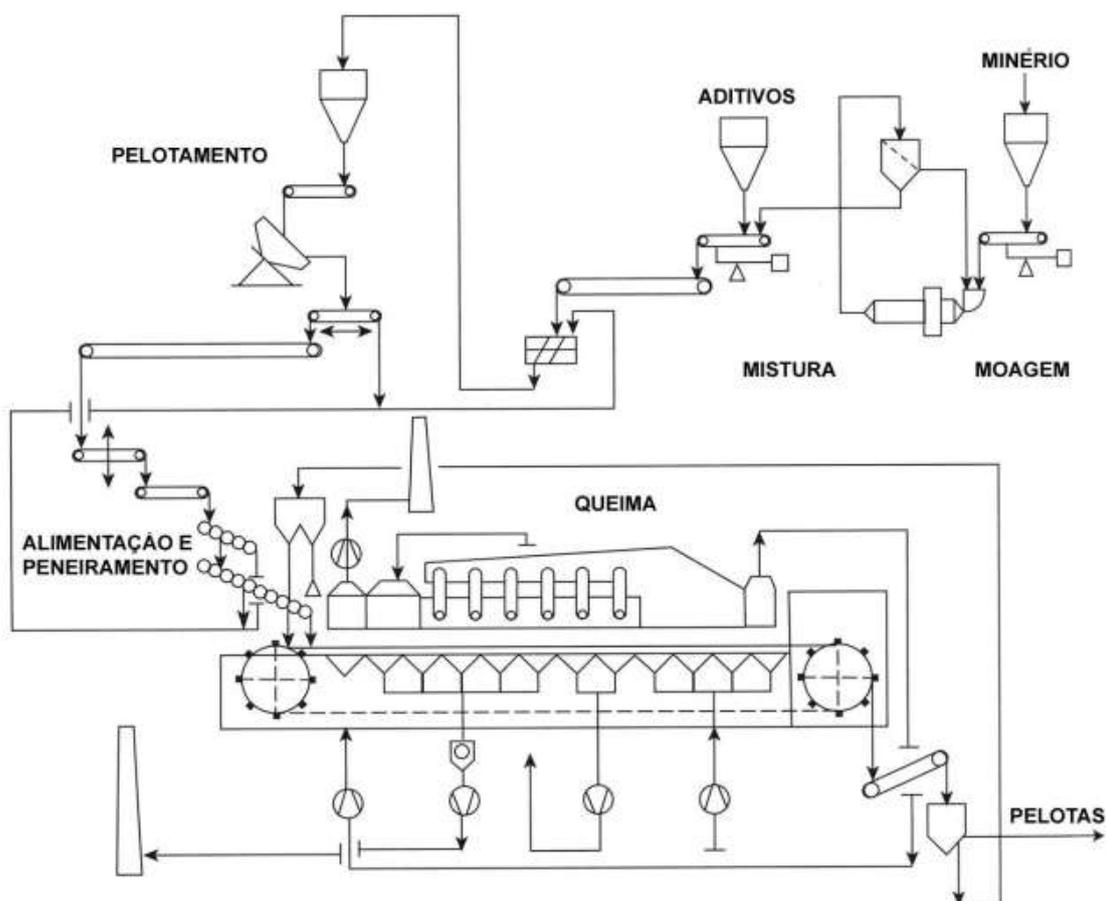
Após a formação, as pelotas são secas para remover o excesso de umidade e, em seguida, são submetidas a processos de endurecimento, como a queima em fornos ou a utilização de grelhas. Essa etapa é importante para conferir às pelotas a resistência

mecânica necessária para suportar as etapas subsequentes do processo de produção do aço.

As pelotas resultantes possuem características uniformes, como tamanho e forma, o que facilita seu manuseio, transporte e utilização nos altos-fornos. Elas apresentam maior resistência mecânica, densidade e menor porosidade em comparação com o minério fino, o que contribui para um processo de redução mais eficiente e uma melhor qualidade do produto.

A pelletização desempenha um papel crucial na indústria siderúrgica, permitindo o aproveitamento de minérios finos que, de outra forma, não seriam viáveis para a produção de aço. Além disso, as pelotas oferecem benefícios como maior eficiência energética, redução de emissões de gases poluentes e menor consumo de matérias-primas.

Figura 16: Fluxograma Pelotização.



Fonte: Apostila (Processos de Aglomeração de Minérios) – Escola Politécnica – USP (2017).

A pelletização oferece diversas vantagens, como a capacidade de utilizar minérios de ferro de baixa qualidade, melhor eficiência energética em altos-fornos, redução das

emissões de gases poluentes e aumento da produtividade na indústria siderúrgica. Além disso, essa técnica é aplicada na produção de ferro esponja, síntese de ferro metálico e em processos de redução direta Gupta e Srinivasan (2019).

A Vale iniciou estudos para construção da primeira usina de pelotização em 1961, entrando em operação em 1969. Situada na cidade de Vitória - Espírito Santo, próximo ao porto de Tubarão. Esta, foi idealizada para possibilitar o aproveitamento dos minérios ultrafinos *pellet feed* extraídos nas minas do quadrilátero ferrífero (MG), que até então eram descartados como rejeito apesar do elevado teor de ferro, com capacidade de produção inicial de 2,1Mt/ano de pelotas.

O processo de aglomeração de finos de minérios com granulometria inferior 0,15mm, considerando como matéria-prima o *pellet feed*, que possui elevada superfície específica, em formas esféricas na faixa de 8 a 18mm de diâmetro denominadas pelotas, que são obtidas por rolamento desses finos em discos ou tambores pelotizadores que, após tratamento térmico a temperaturas entre 1250°C – 1320°C, adquirem características apropriadas para alimentação dos fornos de redução

Atualmente a Vale conta com 11 usinas de pelotização no mundo, sendo que oito delas situam-se no complexo pelotizador de Tubarão (ES), duas no Quadrilátero Ferrífero (MG) e uma usina em Oman no oriente médio.

Figura 17: Aglomerado de Pelotas.



Fonte: VALER EDUCAÇÃO – Vale.

## **5 OBJETIVO**

### **5.1 Objetivo geral**

Determinar os parâmetros da concentração magnética para remoção de minerais portadores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e obtenção de pellet feed conforme as especificações da pelotização, máx. 1,5% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

### **5.2 Objetivos específicos**

Caracterizar o rejeito gerados pelas usinas de beneficiamento de minério de ferro do Complexo de Carajás que são direcionados para a barragem de rejeitos do gelado.

Caracterizar e quantificar os minerais de ganga presentes nas amostras.

Buscar os parâmetros para obtenção das especificações do pellet feed e maximizar a recuperação mássica que possibilite o menor descarte de rejeito para a barragem.

## 6 JUSTIFICATIVA

Diante da necessidade crescente do melhor aproveitamento dos recursos, redução de custos e maior eficiência dos processos, é de suma importância que a geração de rejeitos seja a mínima e se tenha baixos teores de Fe. Desta forma, considerando que o rejeito da barragem do gelado tem teor de Fe acima de 60%, contaminantes com teores relativamente baixos e granulometria que pode ser classificada economicamente, pretende-se com esse trabalho, identificar a partir do rejeito de minério de ferro oriundo da barragem do gelado na alimentação da concentração magnética, um maior aproveitamento do teor de alumina gerado no rejeito e uma melhor recuperação mássica do produto concentrado.

## 7 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentadas as informações relevantes do processo da separação magnética. Também serão pontuados os teores e a mineralogia do rejeito da barragem do gelado e os processos de beneficiamento.

### 7.1 Magnetismo

O magnetismo desempenha um papel vital em nossa vida cotidiana, desde o funcionamento de ímãs de geladeira até aplicações em eletrônicos, geração de energia elétrica e medicina, como a ressonância magnética. Compreender esses conceitos básicos do magnetismo é fundamental para explorar seus muitos aspectos e aplicações na ciência e na tecnologia. O magnetismo também está relacionado a capacidade de atrair ou repulsar materiais que tem propriedades magnéticas. Esses campos magnéticos são criados por cargas elétricas em movimento, como elétrons que orbitam em torno de núcleos atômicos.

O magnetismo ocorre por meio de dipolos magnéticos, descritos como polo norte e polo sul, ou seja, polos que tenham mesma natureza vão se repelir, enquanto polos diferentes vão se atrair. Para compreender o magnetismo, é importante conhecer os tipos de magnetismo, incluindo o ferromagnetismo, o paramagnetismo e o diamagnetismo. O ferromagnetismo é o tipo mais comum, encontrado em materiais como o ferro, o cobalto e o níquel, que apresentam propriedades magnéticas permanentes mesmo na ausência de um campo magnético externo. O paramagnetismo ocorre em materiais que são atraídos por um campo magnético externo, como ilmenita, rutilo, wolframita. Monazita, cromita, hematita, dentre outros, enquanto o diamagnetismo envolve materiais que são levemente repelidos por um campo magnético, como o quartzo, feldspato, calcita, caulinita, dentre outros.

O ímã é um corpo magnético que possui dois polos e mesmo que seja quebrado em diversos pedaços, continuará mantendo os dois polos. De acordo Haliday (2009), em alguns materiais, o campo magnético dos elétrons se combina e acarreta um campo magnético externo, como é o caso dos ímãs permanentes.

Além disso, os ímãs têm a capacidade de magnetizar outros materiais. Quando um objeto é colocado próximo a um ímã, os domínios magnéticos desse objeto podem

alinhar-se com o campo magnético do ímã, tornando-se magnetizados. Essa propriedade é utilizada em diversas aplicações práticas, como a criação de motores elétricos, geradores, transformadores e dispositivos de armazenamento de dados, como discos rígidos e fitas magnéticas. Os campos magnéticos estão presentes em várias escalas na natureza, desde o campo magnético terrestre até os campos magnéticos gerados por estrelas e galáxias. Também existem partículas subatômicas com propriedades magnéticas, como elétrons e prótons.

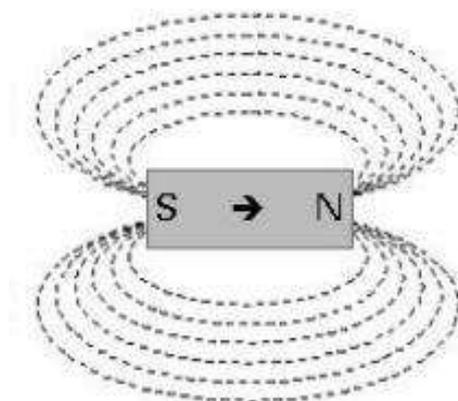
## 7.2 Separação magnética

A separação magnética é um processo utilizado na indústria mineral para separar minerais magnéticos de minerais não magnéticos. Esse método se baseia nas propriedades magnéticas dos minerais, aproveitando a capacidade de alguns materiais de serem atraídos por um campo magnético.

Vale ressaltar que o campo magnético é fundamental na separação de materiais quando submetidos ao campo magnético, em um processo de concentração magnética.

Conforme figura 7, as linhas que ligam de uma à outra extremidade dos polos, forma o campo magnético.

Figura 18: Linhas de campo magnético.



Fonte: Adaptado de Pimenta (2014).

Para Sampaio e Luz (2004), a separação magnética é um método consagrado no beneficiamento de minérios.

Sampaio et al. (2007), registram que a atração magnética de um mineral, ao ser submetido a um campo magnético, depende de sua composição química, devido a sua forma de ocorrência nos depósitos minerais.

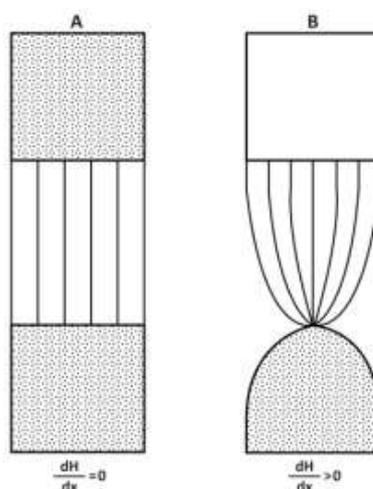
Segundo Sampaio et al. (2018), destacam a importância da técnica na concentração de minerais magnéticos, contribuindo para a eficiência e otimização dos processos de beneficiamento mineral.

Segundo Svoboda e Fujita (2003), a separação magnética é baseada nas propriedades magnéticas dos minerais, onde a aplicação de um campo magnético cria forças de atração ou repulsão entre os minerais, permitindo a separação seletiva.

Shao et al. (1996) destacam que a intensidade do campo magnético é um fator determinante na eficiência da separação magnética. Quanto maior a intensidade do campo, maior será a força de atração ou repulsão entre os minerais, resultando em uma separação mais eficiente e seletiva.

Se o campo magnético quando uniforme for aplicado a uma partícula, as forças que atuam sobre os dois polos são iguais e opostas, ou seja, o resultado das forças é nula. Quando o campo aplicado nas duas extremidades não tiver mesma intensidade, ocasionará na ação de uma força sobre a partícula. A variação do campo, conhecida como gradiente, provoca uma atração ou repulsão do material. A figura a seguir ilustra essa condição: onde A apresenta um campo uniforme, ou seja, a força é nula, enquanto B, possui campo convergente, ou seja, o campo converge para o mesmo ponto.

Figura 19: Campo magnético homogêneo (a) e convergente (b)



Fonte: Tratamento de Minérios – 6ª Edição – Capítulo 8 – CETEM (2018).

Conforme Wills e Napier-Munn (2006), o gradiente magnético é de extrema relevância para que ocorra a separação, pois atua na força magnética exercida sobre uma partícula.

Durante o processo de separação magnética, um minério contendo minerais magnéticos e não magnéticos é submetido a um campo magnético intenso. Os minerais magnéticos são atraídos e se separam dos minerais não magnéticos, possibilitando a sua recuperação. Esse processo é utilizado para aumentar a concentração dos minerais de interesse, como ferro, manganês, cromita e ilmenita, facilitando sua posterior extração e beneficiamento.

A separação magnética desempenha um papel essencial na mineração, permitindo a concentração e a recuperação de minerais magnéticos. Autores como Lima et al. (2012) em "Separação magnética a úmido na mineração: descrição e análise crítica de aplicação" destacam a eficácia da técnica na remoção de impurezas e no aumento do teor de minerais valiosos, contribuindo para a eficiência e a sustentabilidade na indústria mineral.

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

$$F_{\text{mag}} \geq \sum F_c$$

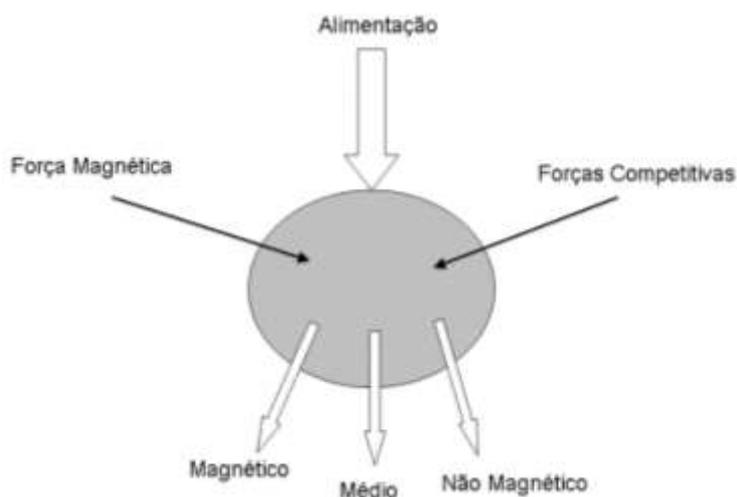
Onde:

$F_{\text{mag}}$ : força magnética

$F_c$ : forças competitivas

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

Figura 20: Reprodução esquemática do processo de separação magnética.



Fonte: Svoboda (2004).

Segundo Paula (2009), susceptibilidade magnética é a propriedade do mineral que determina sua resposta quando exposto a um campo magnético. De acordo com a susceptibilidade, os minerais podem ser classificados em três categorias:

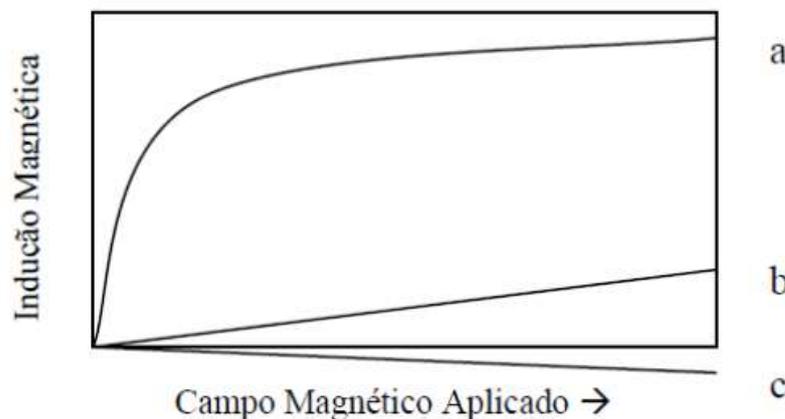
**Ferromagnéticos:** são minerais atraídos fortemente pelo campo magnético, como a magnetita por exemplo.

**Paramagnéticos:** são minerais atraídos fracamente pelo campo magnético, como a hematita e a goethita por exemplo.

**Diamagnéticos:** são minerais repelidos pelo campo magnético, como o quartzo, caulinita e gibbsita.

A figura abaixo apresenta um esquema desse processo, apresentando a curva de susceptibilidade magnética típica dos minerais ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos.

Figura 21: Indução magnética para diferentes espécies mineralógicas. a) ferromagnéticas, b) paramagnéticas e c) diamagnéticas.



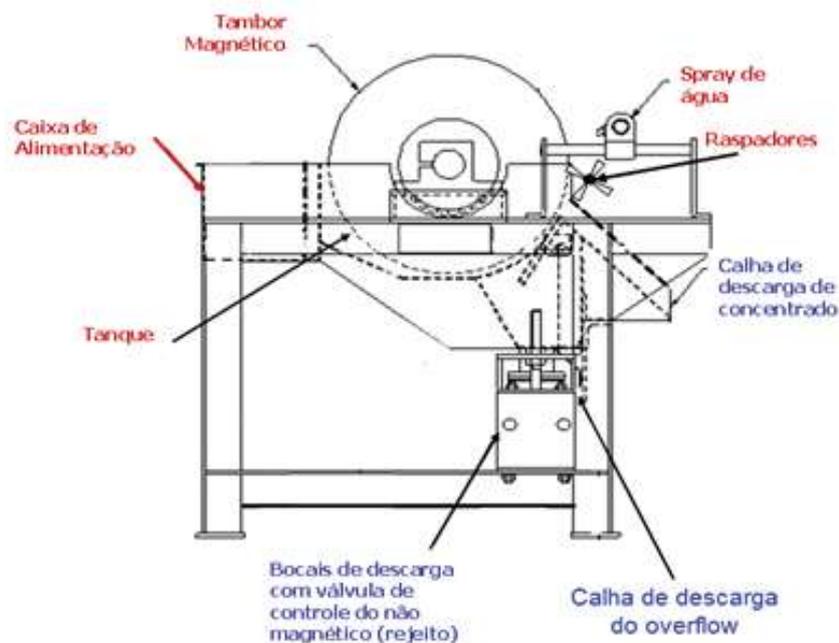
Fonte: LUZ (2004).

Para Queiroz (2005), a estrutura mineralógica/física dos minerais influencia diretamente no processo de concentração magnética. Os pontos mais relevantes destacados por ele são:

- Porosidade elevada das partículas (maior que 30% da área) exige que a água de lavagem do concentrador magnético seja aplicada com menor pressão e/ou trabalhar com um gap mais fechado e/ou percentual de sólidos mais elevados da polpa de alimentação a fim de garantir recuperação mássica.
- Quartzo tipicamente mais grosso que os minerais de ferro resultam num efeito negativo quanto à recuperação mássica, devido a necessidade de abertura do gap para evitar entupimentos por “engaiolamento”, causando ao mesmo tempo perda dos minerais de ferro de granulometria mais fina.
- Quartzo com inclusões de hematita tende a ser recuperado na concentração magnética de alta intensidade de campo. Este caso é frequente em minérios tipicamente specularíticos.
- Quartzo com rugosidade elevada tende em aderir à superfície dos minerais de ferro, podendo ser direcionado ao concentrado.
- Magnetita preservada, relictual ou associada prejudica a concentração magnética de alta intensidade. Portanto, deve-se evitar qualquer quantidade.
- Partículas menores que 0,075mm tendem a constituir o rejeito da concentração magnética convencional aplicada em minério de ferro. Uma revisão desse conceito realizado em 2009 por Paula, constatou que os concentradores magnéticos convencionais aplicados em minério de ferro perdem eficiência de separação para particulados menores que 0,045mm.

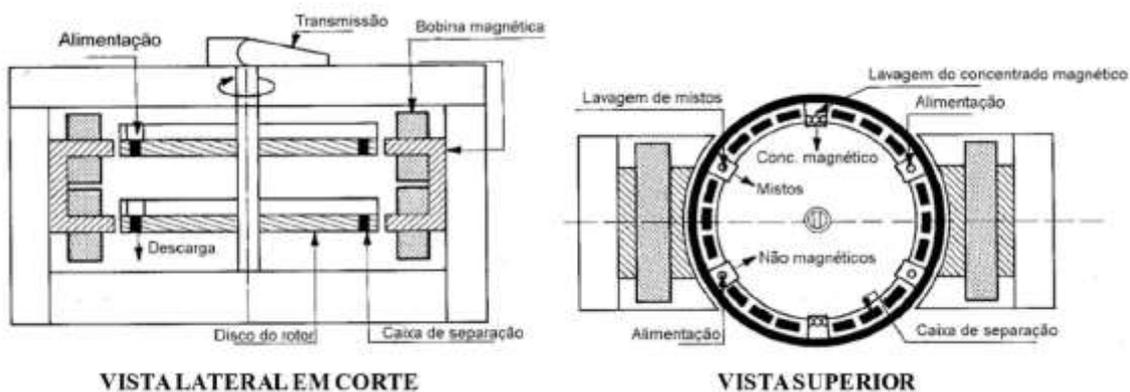
Preponderantemente, a aplicação da concentração magnética de forma a úmido tem sido usada no beneficiamento do minério de ferro, podendo destacar os concentradores de tambor (WD / WDRE) e os concentradores de carrossel (WHIMS).

Figura 22: Desenho esquemático de um concentrador magnético de tambor.



Fonte: VALE S/A. Livro 3 – Concentração Magnética, Flotação e Reagentes (2020).

Figura 23: Vista lateral e superior de um separador magnético de carrossel.



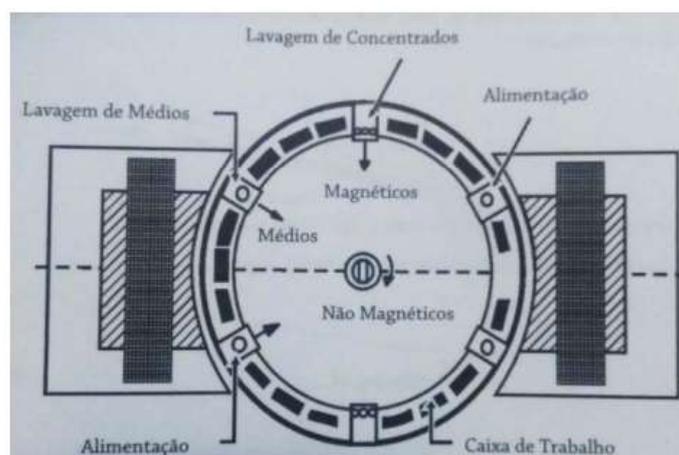
Fonte: VALE S/A. Livro 3 – Concentração Magnética, Flotação e Reagentes (2020).

Figura 24: Matrizes dentro do separador magnético de carrossel.



Fonte: ROCHA (2018).

Figura 25: Representação esquemática do separador de alta intensidade.



Fonte: VALADÃO (2012).

Diante da crescente necessidade de beneficiamento de rejeito que tem granulometria mais fina, a separação magnética tem desempenhado um papel importante na obtenção de produtos de alta qualidade, melhorando a eficiência dos processos industriais e aumentando a rentabilidade da extração mineral.

O desempenho de um separador magnético é influenciado pela interação de diversas forças com diferentes intensidades e alcances. A força mais significativa é a força magnética, enquanto a separação de partículas que respondem ao magnetismo depende de como elas reagem a essa força magnética em comparação com outras forças concorrentes, como a força gravitacional, hidrodinâmica, centrífuga e interações entre as próprias partículas (SVOBODA, 1993).

### 7.3 Amostragem

A partir do início da segunda metade do século XX, anos 50, algumas teorias voltadas a uma melhor compreensão e avaliação de jazidas minerais ou objetos compactos, tendo como destaque duas destas, sendo, teoria das Variáveis Regionalizadas ou Geoestatística, de G. Matheron e a Teoria da Amostragem de Materiais Particulados, de P. Gy. O formalismo de Pierre Gy veio preencher uma importante lacuna científica e tecnológica de grande relevância para o controle da produção, notadamente na indústria mineiro-metalúrgica.

Define-se por amostragem, uma sequência de operações que tem por objetivo retirar uma fração significativa, amostra, de determinado universo. Segundo Gy (1998), “o único objetivo da amostragem é reduzir a massa de um lote L até a massa adequada a um determinado objetivo sem inserir mudanças significativas em suas outras propriedades”.

As amostras geralmente são constituídas por uma série de frações, ou incrementos, retirados do universo, ou lote L, a instantes diferentes. O universo é o conjunto de todos os resultados possíveis de variáveis aleatórias, e a amostra é um conjunto reduzido de observações tomadas desse universo.

De acordo com Gy (1998), a média do erro e a variância do erro nunca são nulas estruturalmente. A representatividade de uma amostra ocorre quando a combinação desses dois fatores apresenta valores menores que o máximo estabelecido entre as partes interessadas, usualmente produtor e consumidor.

Ainda, segundo a teoria da amostragem de Gy (1982), existem alguns erros de amostragem que não podem ser eliminados: erro fundamental, erro de segregação e grupamento e erro de integração. Como consequência, sempre existirá um erro associado ao resultado de qualidade de um lote. Como o resultado de qualidade de um lote nunca é um valor exato, interpreta-se que esse resultado apresenta um comportamento de natureza estocástica. Dessa forma, é possível estimar, para qualquer resultado de controle de qualidade, uma faixa de erro devida a fatores relacionados à variabilidade existente entre as partículas do material amostrado.

O objetivo da amostragem é reduzir a massa de um lote L sem alterar significativamente suas demais propriedades. Segundo François-Bongarcon & Gy (2002), “em se tratando da teoria de amostragem, um mau amostrador é um mau amostrador, não importa qual, e uma amostra pode ser ou boa ou má”. Um mau

amostrador geralmente gera amostras enviesadas, e um amostrador correto minimiza este risco.

Não é essencial construir ou operar o sistema de amostragem como um sistema único. Qualquer unidade principal ou combinação de unidades principais podem ser operadas mecanicamente e combinadas a qualquer estágio com operação manual para compor um sistema de amostragem e preparação de amostra completo.

Um cortador de amostra manual também pode ser usado, sujeito às considerações de segurança. Todo sistema de amostragem de interface comercial deverá ser operado de acordo com os requerimentos da norma NBR ISO 3082:2010 vigente, que especificam a massa do incremento, número de incrementos e intervalo de amostragem para amostragem com base em massa, base tempo e randômica estratificada.

Segundo Gy (1998) um procedimento de amostragem inadequado pode levar a enviesamentos de até 1.000% para o caso de amostragem primária (probabilística), de até 50% para amostragem secundária (probabilística, mas incorreta) e de 0,1 a 1,0% para as etapas de análise.

O erro total de amostragem é o somatório do erro de amostragem propriamente dita ( $E_{ap}$ ) e do erro de preparação da amostra primária ( $E_p$ ), para obtenção da amostra final.

Equação para verificação do Erro Total de Amostragem ( $E_a$ ) - Segundo Pierre Gy

$$E_a = E_{ap} + E_p$$

No prefácio do livro que descreve os princípios da teoria de amostragem desenvolvida por Pierre Gy, encontra-se a seguinte citação: “a amostragem é uma das operações básicas da mente humana, porém ela não recebe a atenção que merece” (Pitard, 1993).

A amostragem é, sem dúvida, uma das operações mais complexas e passíveis de introduzir erros, deparadas pelas indústrias da mineração. O emprego correto da teoria de amostragem possibilita o controle dos erros amostrais significativos, dando previsibilidade dos resultados, pois os ajustes dos sistemas de produção baseiam-se em informações satisfatórias.

## 7.4 Caracterização de polpa

A caracterização de polpa de minério é um processo essencial na indústria de mineração, permitindo a análise e avaliação das propriedades físicas e químicas do minério em suspensão. Essas informações são fundamentais para otimizar os processos de beneficiamento, monitorar a qualidade do produto e tomar decisões estratégicas na extração mineral.

A determinação das características granulométricas da polpa, incluindo o tamanho e a distribuição das partículas, é essencial para ajustar os parâmetros operacionais dos equipamentos utilizados no processamento mineral. Além disso, a avaliação da composição química da polpa é vital para compreender a concentração de minerais de interesse e impurezas presentes, influenciando diretamente as estratégias de separação e enriquecimento. Técnicas avançadas, como análise granulométrica por laser, difração de raios X, e análise de elementos químicos por espectrometria, são comumente empregadas na caracterização da polpa de minério. Esses métodos oferecem precisão e confiabilidade, permitindo uma tomada de decisão mais informada na planta de beneficiamento.

Além disso, a análise da reologia da polpa, que estuda as propriedades de fluxo e deformação, desempenha um papel significativo na otimização do transporte e manuseio do minério ao longo do processo. Compreender a viscosidade e a capacidade de fluidez da polpa é essencial para evitar obstruções em tubulações e garantir uma operação eficiente.

Quanto a caracterização em termos microscópicos referente a reologia da polpa, PAWLIK; LASKOWSKI (1999) consideram importante o balanço de três forças originadas pela: interação hidrodinâmica, forças entre partículas e difusão browniana. A contribuição especificidade de cada força depende do tamanho, da distribuição de tamanhos, da forma e da rugosidade das partículas, da percentagem de sólidos e das condições físico-químicas da polpa.

A viscosidade de um fluido pode ser definida como sendo a propriedade que o mesmo apresenta em oferecer uma maior ou menor resistência à deformação, quando sujeito a esforços de escorregamento. O fluido, em tratamento de minérios, é constituído pelo sistema água/minério, ou seja, a polpa (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

Garcia e colaboradores (2003) relataram que a viscosidade aumenta conforme o tamanho de partícula diminui e que a tensão no ponto de escoamento é proporcional ao

número de contatos e a energia total entre as partículas. Outros fatores também podem ser levados em consideração, como o meio químico e até temperatura da polpa.

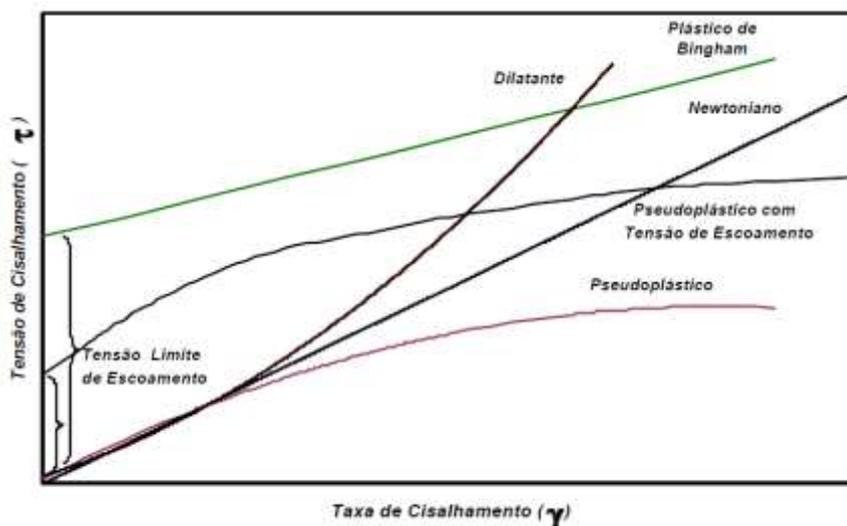
Conhecer o comportamento reológico da polpa é fundamental para se entender as mudanças que possam ocorrer na estrutura de forma a nortear o dimensionamento ou desenvolvimento de equipamentos e controles do processo de beneficiamento. Polpas de minério podem ter fluidos reológicos do tipo Newtoniano ou não-Newtoniano, sendo que estes se diferem pela relação que há entre a viscosidade e a taxa de cisalhamento, onde no primeiro fluido, não se modifica a viscosidade em função da taxa de cisalhamento.

O fluido não-Newtoniano pode ter a seguinte classificação: pseudoplástico com tensão de escoamento, plástico de Bingham, pseudoplástico e dilatante. Além destes, ainda podem existir os fluidos tixotrópicos ou reopéticos, que dependem do tempo de aplicação da taxa de cisalhamento, diferentes dos demais que dependem do tempo de aplicação da taxa de cisalhamento constante.

No caso fluidos do tipo plástico de Bingham e pseudoplástico com tensão de escoamento, variam dos demais por causa da necessidade uma tensão inicial, descrita como tensão limite de escoamento ou *yield stress*, a fim de que o fluido inicie o escoamento. Conforme Chaves (1996), a maioria das polpas em tratamento de minérios apresenta o comportamento de plástico de Bingham.

Para os fluidos pseudoplásticos, nota-se a diminuição da viscosidade aparente em detrimento do aumento da taxa de cisalhamento. Já o fluido dilatante ocorre elevação da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento.

Figura 26: Rapid determination of non-Newtonian flow behaviour in mineral suspensions.



Fonte: BAKSHI, A.K.; KAWATRA, S.K. (1996).

A relação existente entre a tensão ( $\tau$ ) e a taxa de deformação ( $\dot{\gamma}$ ) do fluido é chamada equação reológica de estado ou equação constitutiva (Bretas e D'Avila, 2000).

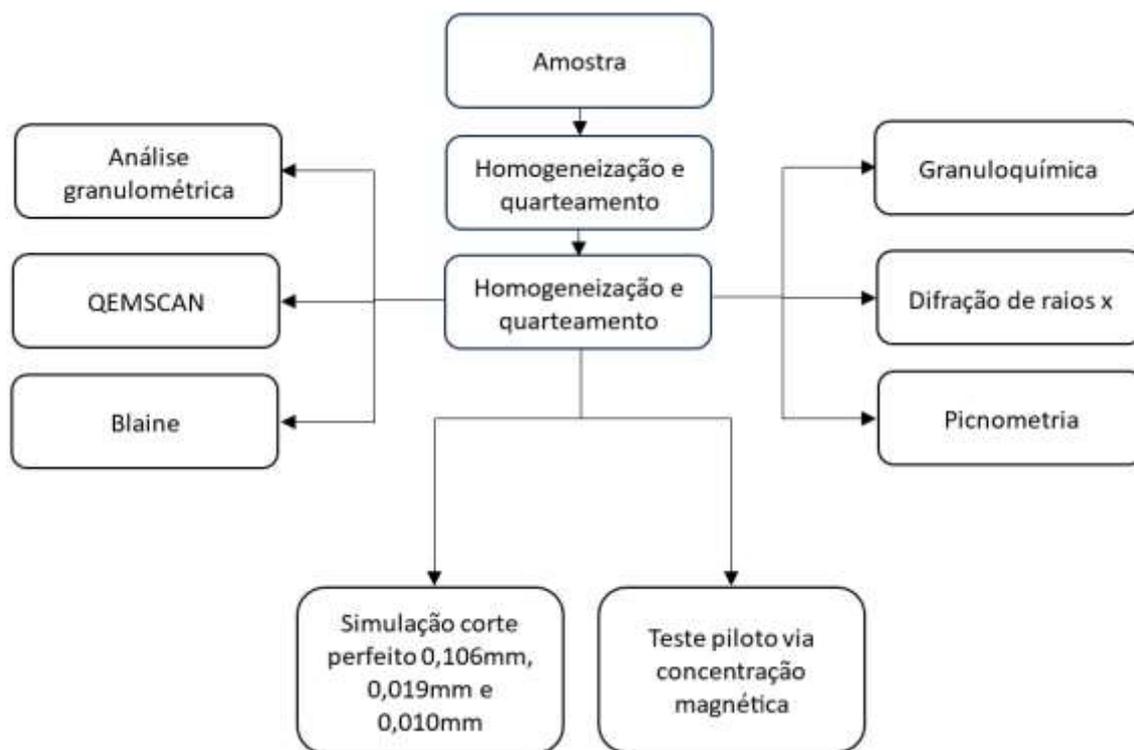
Em resumo, a caracterização da polpa de minério é uma etapa crítica para o sucesso das operações nas indústrias de mineração.

## 8 METODOLOGIA

Neste capítulo serão informados os procedimentos experimentais que incluem a distribuição e os resultados das amostras coletadas a partir dos furos de sondagem da barragem, realizados em janeiro de 2017. A base para a campanha de 2017 foi à amostragem realizada no ano de 2010 (Figura 11).

A caracterização inicial contemplou a preparação, granuloquímica e a mineralogia via QEMSCAN, difração de raios X por faixa, corte perfeito em 0,106mm, 0,019mm e 0,010mm e concentração magnética.

Figura 27: Fluxograma da distribuição das amostras – Barragem do Gelado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A seguir são descritos resumidamente os procedimentos dos ensaios realizados:

### 8.1 Preparação inicial das amostras

**Preparação inicial das amostras (Vale-PRO-007912):** as etapas de homogeneização e quarteamento, tanto na preparação inicial quanto dos produtos dos ensaios de concentração e classificação descritos nos itens a seguir, foram realizadas em

divisores rotativos com 60,0 kg, 6,0 kg ou 1,0 kg de capacidade (Dialmática), operando conforme a NBR ISO 3082 - Minérios de Ferro - Procedimentos de Amostragem e Preparação de Amostras, cuja operação consiste basicamente nas seguintes etapas: acionou-se o tambor e posteriormente a correia mantendo a rotação de ambos, ajustada para no mínimo 20 voltas do carrossel. Ao final do quarteamento, tomou-se as massas dos coletores diametralmente opostos até que a massa necessária ao processo subsequente fosse atingida. Caso necessário, faz-se uso de divisores de menor capacidade para ajuste da massa. A figura a seguir apresenta os divisores rotativos utilizados no CPT.

Figura 28: Divisores rotativos.



**Divisor rotativo de 60kg**



**Divisores rotativos de 1kg**



**Divisor rotativo de 6kg**

Fonte: RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

A figura a seguir apresenta as etapas de preparação inicial da amostra de Gelado de Grande Volume. Inicialmente como parte da amostra veio com umidade elevada,

realizou-se uma pré-secagem, com temperatura controlada (50°C a 60°C) para permitir o um adequado manuseio. Em seguida a amostra foi encaminhada para a desagregação em peneira de 5mm e posteriormente quartearamento em divisor rotativo de 60kg. Por último foram gerados incrementos representativos para seguir com a caracterização inicial e tecnológica desta amostra.

Figura 29: Etapas de preparação inicial das amostras.



Fonte: RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

## 8.2 Análise granulométrica

**A análise granulométrica (Vale-PRO-007913 e Vale-PRO-00720):** para os materiais que se encontravam acima de 6,35mm, submeteu-se a alíquota obtida no divisor carrossel para análise de granulometria a um corte a seco nesta malha, sendo o material retido nesse peneiramento direcionado à análise série macro a úmido, utilizando vibrador de peneiras (Dialmática). Posteriormente submeteu-se o passante em 6,35mm do corte e da análise granulométrica do material da série macro a um peneirador série micro a úmido (Dialmática). O material correspondente a cada uma das frações granulométricas foi seco em estufa a 105°C de temperatura. Para a microanálise granulométrica efetuou-se corte

granulométrico em outra alíquota da amostra, na malha de 0,045mm. O material passante no corte foi então submetido à agitação mecânica, sendo sifonada uma alíquota para a realização da microanálise granulométrica utilizando granulômetro a laser (Mastersizer Malvern – modelo 2000) ou *cyclosizer*. As análises granulométricas de produtos moídos e do *underflow* da deslamagem e classificação, concentrado e rejeito foram realizadas a úmido diretamente em peneiramento série micro, e no caso do *overflow* da deslamagem e classificação diretamente na microanálise por difração a laser. A figura a seguir apresenta as fotos dos equipamentos.

Figura 30: Peneirador suspenso (série micro) e Mastersizer 2000.



Fonte: RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

### 8.3 Caracterização mineralógica por microscopia eletrônica automatizada

As análises realizadas a partir de seções polidas de 30mm de diâmetro, sendo utilizado no embutimento resina Epoxyglass com endurecedor na proporção de 5:1, além de diluição com acetona na proporção de 5 a 10% em volume para evitar a formação de bolhas. Durante o embutimento foi adicionado grafite com granulometria próxima de cada fração, com intuito de separar as partículas para a análise de liberação. Efetuou-se o polimento das seções e posteriormente a “metalização” da superfície com carbono. As análises foram efetuadas em sistema QEMSCAN (FEI) com fonte FEG (*field emission gun*) pelo método PMA (*particle mineral analysis*) com medidas bidimensionais, individualizadas por partícula, analisando no mínimo 5000 partículas por seção polida. Os dados posteriormente foram tratados utilizando o *software* iExplorer, em que foi possível obter a quantificação modal, imagens digitais, identificação das associações mineralógicas e espectro de liberação. Nas análises de liberação, o QEMSCAN realiza a

conversão estereológica, que utiliza uma equação integral para transformar as informações obtidas por análise de imagens em duas dimensões, para dados tridimensionais. Esta análise permite extrapolar os dados, tornando as informações obtidas mais precisas. A metodologia completa de análise mineralógica via QEMSCAN é descrita no APÊNDICE 1.

#### 8.4 Área superficial específica

**Área superficial específica (Vale-PRO-007908):** os ensaios de Blaine foram realizados seguindo duas metodologias. O método manual é executado no permeabilímetro de Blaine. O ensaio consiste em colocar a amostra, previamente medida em balança analítica, na célula do equipamento. A célula é encaixada no compartimento do aparelho com a torneira na posição fechada, e em seguida, é reaberta para a sucção do fluido (óleo mineral “colorido”) manométrico, até atingir o 2º menisco do tubo para então fechamento da torneira. Quando o fluido manométrico passar pelo 2º menisco, é cronometrado o tempo até atingir o 3º menisco. A superfície específica da amostra é calculada usando a seguinte fórmula. Lembrando que a densidade real utilizada no cálculo da superfície específica é obtida previamente em picnômetro a gás.

$$Se = \frac{k_2 \times t^{\frac{1}{2}}}{d}$$

Onde:

Se = Superfície específica (cm<sup>2</sup>/g);

K<sub>2</sub> = Constante do aparelho (determinada durante a calibração);

t = Tempo gasto, em segundos, para o fluido deslocar-se do 2º menisco (intermediário) até o 3º menisco (inferior);

d = densidade do material (g/cm<sup>3</sup>).

O segundo método é executado no equipamento automático PC Blaine Star (Wasagchemie®). Esta atividade é realizada em uma sala climatizada com temperatura controlada de 21±2 °C. Anteriormente a execução o equipamento é calibrado com um padrão de quartzo de densidade de 2,65g/cm<sup>3</sup> e superfície específica de 3.500cm<sup>2</sup>/g. Em

seguida após entrar com os parâmetros do ensaio, tais como, identificação da amostra, temperatura ambiente e densidade real determinada pelo equipamento Pentapycnometer (Quantachrome®), o Blaine Star fornecerá a massa de amostra necessária a ser colocada na célula de amostra de volume 73,40cm<sup>3</sup>. Após este procedimento o equipamento irá realizar 3 análises, depois descarta a primeira e o resultado será a média destes valores.

## 8.5 Densidade real

**Densidade real (Vale-PRO-007874):** o ensaio realizado conforme a norma ASTM D5550-14 (*Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer*, 2014), pelo método de picnometria a gás (Hélio), em equipamento Pentapycnometer (Quantachrome®). Para as análises foi utilizada célula com volume de 135 cm<sup>3</sup>, sendo a amostra previamente pulverizada em moinho Herzog HSM 100-D e completamente secada em estufa, sendo analisada após atingir a temperatura ambiente, em sala com controle de temperatura (21±2 °C). Para o ensaio adiciona-se  $\frac{3}{4}$  do volume da célula de amostra, e introduz a célula no equipamento. O equipamento possui uma balança integrada que já determina a massa para o ensaio. Posteriormente entra-se com os parâmetros, tais como identificação da amostra, desvio e número de análises, e por último executa o ensaio. O resultado é a média dos valores obtidos.

## 8.6 Concentração magnética

**Concentração magnética (Vale-PRO-007907):** os ensaios de concentração magnética da amostra de Gelado foram realizados nos concentradores eletromagnéticos tipo WHIMS (*wet high intensity magnetic separator*) da Gaustec modelo Micromag, equipamento que opera com matrizes de separação. Foi utilizado o gap de 1,5mm e 3,8mm, campo variando entre 7.500 e 11.200 Gauss e água de lavagem do médio de 0 e 1 kgf/cm<sup>2</sup>.

## 8.7 Difração de raios X

**Difração de raios X:** as amostras foram pulverizadas e analisadas no difratômetro Bruker D8 Advance, detector Linkeye XE com radiação de cobalto, pelo método do pó no Laboratório de Mineralogia do Centro de Desenvolvimento Mineral (CDM) da Vale.

Os difratogramas coletados foram tratados no software de interpretação Diffrac.Eva de quantificação TOPAS, também fornecido pela Bruker.

## 8.8 Análise química

**Análise Química:** realizadas em laboratório químico, pelos métodos de fluorescência de raios X, (Fe, SiO<sub>2</sub>, P, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn, TiO<sub>2</sub>, CaO, MgO), gravimetria (PPC) e via úmida por dicromatografia (FeO). O valor de PPC, pode ser negativo quando o material apresenta compostos não totalmente oxidados e há ganho de massa (oxigênio) durante a calcinação. Quando necessário, dependendo da faixa de tamanho, as alíquotas para análise química foram britadas em 2,0mm em britador de rolos de laboratório (FLSmidth), sendo posteriormente realizada homogeneização e quarteamento em divisor rotativo (Dialmática), coletando-se uma alíquota de aproximadamente 30g, sendo esta posteriormente pulverizada em moinho pulverizador (Herzog HSM 100-D) e encaminhada ao laboratório químico.

## 9 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir desta seção, serão apresentados os resultados oriundos das análises químicas, granulométricas, caracterização mineralógica, corte perfeito e teste de concentração magnética da polpa de minério ferro da barragem do gelado, visando prioritariamente a relação entre o teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e a RM que melhor atenda a especificação do setor de Pelotização.

### 9.1 Caraterização inicial

A seguir são apresentadas fotos evidenciando o aspecto macroscópico das amostras tais quais recebidas dos furos de sondagem da barragem do gelado. As amostras demonstraram variação de umidade, conforme apresentado na figura b.

Figura 31: Amostras Tais quais recebidas.



Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

A tabela a seguir apresenta a análise química global e por faixa das amostras. O principal contaminante é o  $\text{SiO}_2$ . O  $\text{Al}_2\text{O}_3$  concentra-se principalmente nas frações acima de 0,106mm, decresce até a faixa de 0,027mm, e eleva-se novamente nas frações mais finas. Este mesmo comportamento é observado com o P,  $\text{SiO}_2$ , Mn e  $\text{TiO}_2$ . Os deletérios CaO e MgO não são significativos.

Tabela 9 - Análise química por faixa

Amostra	Fração (mm)	Retido Simples (%)	Análise Química (%)								
			Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	PFC
Gelado	+0,15	0,91	44,74	17,51	0,046	8,89	1,282	0,304	0,054	0,184	6,65
	-0,150+0,106	1,73	54,66	8,51	0,044	5,89	0,855	0,211	0,026	0,140	5,07
	-0,106+0,075	4,37	60,34	4,68	0,038	3,46	0,706	0,177	0,019	0,062	3,77
	-0,075+0,045	10,98	63,81	2,66	0,033	2,17	0,546	0,135	0,018	0,031	2,77
	-0,045 +0,027	16,17	66,61	1,44	0,028	0,85	0,409	0,098	0,020	0,081	1,45
	-0,027+0,019	11,95	64,81	1,98	0,031	1,93	0,505	0,156	0,020	0,073	2,21
	-0,019+0,014	12,65	63,64	2,44	0,035	2,55	0,518	0,173	0,021	0,082	2,45
	-0,014+0,010	4,02	63,90	2,39	0,034	2,42	0,514	0,181	0,023	0,102	2,37
	-0,010+0,007	13,36	64,27	2,29	0,035	2,41	0,528	0,184	0,022	0,100	2,19
	-0,007	22,96	61,11	3,71	0,060	4,28	0,805	0,254	0,023	0,088	3,54
<b>Global</b>	<b>100,00</b>	<b>62,77</b>	<b>3,02</b>	<b>0,048</b>	<b>2,70</b>	<b>0,701</b>	<b>0,199</b>	<b>0,020</b>	<b>0,052</b>	<b>3,03</b>	

Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

Foi determinada a distribuição simples e acumulada passante do percentual de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em cada fração, para verificar em qual faixa encontra-se os maiores teores deste contaminante. Observa-se que cerca de 50% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se encontra na fração passante em 0,010mm.

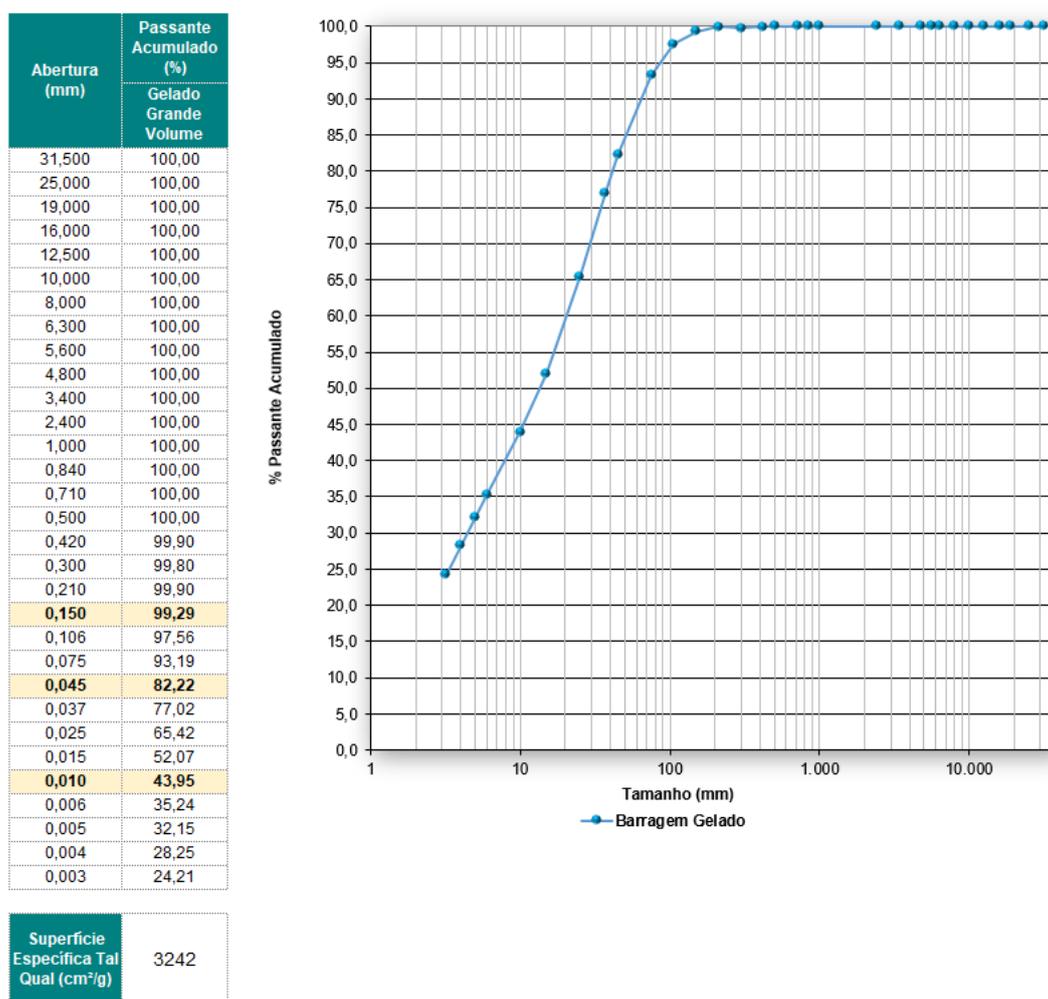
Tabela 10 - Distribuição de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nas frações

Amostra	Fração (mm)	Retido Simples (%)	Teor de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Distribuição de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) Simples	Distribuição Acumulada de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) Maior Que	Distribuição Acumulada Passante de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
Gelado	+0,150	0,91	8,89	3,02	3,02	96,98
	-0,150+0,106	1,73	5,89	3,79	6,81	93,19
	-0,106+0,075	4,37	3,46	5,62	12,43	87,57
	-0,075+0,045	10,98	2,17	8,86	21,29	78,71
	-0,045 +0,027	16,17	0,85	5,14	26,43	73,57
	-0,027+0,019	11,95	1,93	8,60	35,02	64,98
	-0,019+0,014	12,65	2,55	12,00	47,03	52,97
	-0,014+0,010	<b>4,92</b>	<b>2,42</b>	<b>4,43</b>	<b>51,46</b>	<b>48,54</b>
	-0,010+0,007	13,36	2,41	11,96	63,42	36,58
	-0,007	22,96	4,28	36,58	100,00	0,00
<b>Global</b>	<b>100,00</b>	<b>2,70</b>	<b>100,00</b>	-	-	

Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

A tabela e o gráfico a seguir apresentam a distribuição granulométrica das amostras tais quais recebidas. Em relação a fração -0,010mm o resultado é 43,95%. E a superfície específica é de 3.242cm<sup>2</sup>/g.

Tabela 11 - Distribuição granulométrica e superfície específica



Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

Com intuito de investigar os contaminantes, principalmente o  $Al_2O_3$ , observando como está distribuída nas frações, bem como identificar os minerais fonte deste deletério, a caracterização mineralógica também contemplou a análise via QEMSCAN e os resultados são apresentados na tabela 12.

Observa-se que a gibbsita predomina nas frações mais grossas e decresce até a fração 0,027mm, quando ocorre uma leve inversão pontual, a partir desta faixa, a principal fonte de  $Al_2O_3$  torna-se a caulinita.

Tabela 12 - Quantificação mineralógica - QEMSCAN

Amostra	Fração (mm)	Retido Simples (%)	Quantificação Mineralógica (%)									
			Quartzo	Óxidos de Fe	Siotita	Gibbsita	Caulinita	Feldspatos	Outros Silicatos	Ilmenita	Óxidos de Mn	Outras Fases
			SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO(OH), xH <sub>2</sub> O	K(Mg,Fe) <sub>3</sub> [Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> ](OH,F) <sub>2</sub>	Al(OH) <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (OH) <sub>2</sub>	Vários	Vários	FeTiO <sub>3</sub>	Vários	Vários
Gelado	+0,15	0,91	10,68	74,78	0,36	8,67	1,97	1,04	0,37	0,12	0,53	0,78
	-0,150+0,106	1,73	4,54	79,20	0,05	5,98	1,12	0,08	2,03	0,05	3,14	2,54
	-0,106+0,075	4,37	1,76	84,29	0,04	4,65	1,05	0,53	3,65	0,03	1,00	2,83
	-0,075+0,045	10,98	1,36	90,59	0,10	2,31	0,77	0,02	2,32	0,00	0,72	1,48
	-0,045+0,027	16,17	0,40	98,17	0,04	0,18	0,17	0,01	0,30	0,13	0,28	0,21
	-0,027+0,019	11,96	0,62	93,77	0,16	0,72	1,55	0,01	1,64	0,06	0,30	0,97
	-0,019+0,014	12,66	1,34	91,37	0,24	1,76	1,19	0,01	2,11	0,05	0,70	1,12
	-0,014+0,010	4,92	1,00	89,92	0,27	1,04	1,59	0,10	3,40	0,08	0,47	1,75
	-0,010+0,007	13,36	0,99	93,34	0,21	0,97	1,43	0,11	1,32	0,16	0,45	0,77
	-0,007	22,96	2,09	89,85	1,17	0,86	5,36	0,02	0,09	0,08	0,10	0,14
Global	100,00	1,37	91,84	0,38	1,37	2,03	0,07	1,33	0,08	0,46	0,85	

Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

A seguir são apresentadas imagens digitais obtidas via QEMSCAN. Verifica-se a presença de gibbsita (coloração rosa) principalmente nas faixas mais grossas. Esta também aparece livre ou associada aos óxidos de ferro (coloração azul escuro). Já nas frações mais finas predomina a caulinita (coloração turquesa), que também ocorrem livres de associações ou associada aos óxidos de ferro.

Figura 32: Imagens digitais dos minerais – QEMSCAN.



Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

Na caracterização realizada em 2004 em Carajás, apresentada na tabela a seguir, a mineralogia via microscopia ótica indicou que a principal fonte de  $Al_2O_3$  seria a gibbsita em todas as frações, porém com a técnica QEMSCAN, que é composta por *hardware* e *software* que permitem quantificar automaticamente com precisão, foi possível avaliar que nas frações mais finas predomina a caulinita nestes materiais.

Tabela 13 - Quantificação mineralógica via microscopia ótica – Caracterização de 2004

Amostra	Fração (mm)	Recuperação Múltipla (%)	Análise Química (%)						Quantificação Mineralógica (%)						Forma de Alúmina (%)			
			Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	PPC	Hornblenda + Bagnórita	Goethita e Jarosita	Óxido de Mn	Quartzo	Gibbsita	Caulinita	Gibbsita	Caulinita	Goethita e Jarosita	Óxido de Mn
PFCL SiO <sub>2</sub>	+0,105	8,4	83,83	2,59	0,054	2,25	0,66	2,57	77	18	1	2	3	1	54	15	18	2
	-0,105+0,075	8,4	86,12	1,13	0,029	1,46	0,52	2,00	82	13	1	1	2	1	9	16	22	2
	-0,075+0,045	12,5	88,33	0,95	0,026	1,49	0,49	1,90	84	11	1	1	1	<1	57	16	24	3
	-0,045+0,020	32,6	87,43	0,71	0,027	0,82	0,41	1,84	87	9	<1	<1	1	<1	58	16	21	2
	-0,020	39,6	86,30	0,93	0,035	1,81	0,51	1,60	89	8	1	<0,5	1	<1	57	22	18	3
	<b>Global</b>	<b>100,0</b>	<b>86,68</b>	<b>0,98</b>	<b>0,031</b>	<b>1,15</b>	<b>0,49</b>	<b>1,79</b>	<b>86</b>	<b>10</b>	<b>1</b>	<b>&lt;1</b>	<b>1</b>	<b>&lt;1</b>	<b>58</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>2</b>
PFCL Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	+0,105	5,1	82,28	1,32	0,045	4,45	0,63	3,83	78	14	2	1	6	<0,5	82	3	13	2
	-0,105+0,075	7,6	85,84	0,72	0,036	2,72	0,48	2,69	83	12	1	<0,5	4	<0,5	81	3	14	1
	-0,075+0,045	12,7	86,32	0,88	0,036	2,64	0,48	2,49	86	9	<1	<0,5	4	<0,5	84	4	12	1
	-0,045+0,020	21,5	87,89	0,55	0,032	1,76	0,39	1,62	89	8	<1	<0,5	2	<0,05	79	2	17	2
	-0,020	53,1	86,17	0,65	0,038	1,45	0,46	2,19	89	7	1	<0,5	2	<0,5	75	6	17	2
	<b>Global</b>	<b>100,0</b>	<b>85,97</b>	<b>0,79</b>	<b>0,037</b>	<b>1,82</b>	<b>0,46</b>	<b>2,31</b>	<b>88</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>&lt;0,5</b>	<b>2</b>	<b>&lt;0,5</b>	<b>78</b>	<b>5</b>	<b>16</b>	<b>2</b>

Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

A seguir são apresentados uma caracterização mineralógica mais detalhada para o material oriundo da barragem de gelo. Através do QEMSCAN foi possível avaliar os minerais fonte de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e os resultados são apresentados na tabela a seguir. Verifica-se que a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é oriunda basicamente da caulinita e gibbsita e em menor proporção da goethita, que também pode ter este contaminante na sua estrutura. Ressaltando que esta distribuição está diferente da apresentada na tabela 7, devido a uma possível variabilidade mineralógica.

Tabela 14 - Distribuição da Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nos minerais – QEMSCAN

Fração (mm)	Retido Simples (%)	Teor de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Distribuição de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> pelos minerais			
			Goethita	Gibbsita	Caulinita	Outros Minerais
+0,150	0,91	4,75	0,17	1,90	0,82	0,14
-0,150+0,106	1,73	3,00	0,30	2,68	0,74	0,06
-0,106+0,075	4,37	2,18	0,55	3,60	1,17	0,30
-0,075+0,045	10,98	1,31	1,71	4,35	2,53	0,27
-0,045+0,027	16,17	0,41	3,44	0,60	0,99	0,11
-0,027+0,019	11,95	0,94	1,80	1,38	5,17	0,25
-0,019+0,014	12,65	1,22	2,20	4,33	5,09	0,39
-0,014+0,010	4,92	1,10	0,79	0,93	2,47	0,24
-0,010+0,007	13,36	1,02	2,44	2,54	6,47	0,51
-0,007	22,96	1,94	2,85	2,78	30,03	0,92
<b>Global</b>	<b>100,00</b>	<b>1,30</b>	<b>16,25</b>	<b>25,08</b>	<b>55,48</b>	<b>3,19</b>

Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

Também foram realizadas as análises químicas via EDS (espectroscopia de energia dispersiva) dos minerais para quantificar o percentual dos elementos químicos

presentes nos mesmos. Verifica-se que o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  é oriundo da gibbsita e caulinita. Em alguns casos, comprovando o que foi dito anteriormente o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  encontra-se na estrutura da goethita. Também é possível encontrar em menor proporção o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nos feldspatos.

**Tabela 15 - Percentual em massa dos elementos químicos por mineral**

Fração	Mineral	Percentual em massa dos elementos químicos (%)									
		O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ti	Mn	Fe
+0,150mm	Goethita	23,21	0,00	0,00	1,75	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	74,85
	Gibbsita	47,14	0,00	0,00	52,22	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
	Caulinita	48,28	0,00	0,00	31,50	16,96	0,00	0,00	0,00	0,00	3,27
	Feldspato de Al	49,21	0,00	0,00	20,89	25,88	0,00	0,00	0,00	0,00	4,02
-0,150+0,106mm	Gibbsita	45,92	0,00	0,00	49,31	0,63	0,16	0,00	0,00	0,00	3,98
	Goethita	22,78	0,00	0,00	0,18	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	76,39
	Caulinita	48,11	0,00	0,00	25,01	21,30	0,00	0,00	0,00	0,00	5,58
-0,106+0,075mm	Gibbsita	45,21	0,00	0,00	47,80	0,61	0,16	0,00	0,00	0,00	6,21
	Goethita	22,60	0,00	0,00	0,36	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	76,80
	Caulinita	40,58	0,00	0,00	19,74	13,67	0,00	0,00	0,00	0,00	26,01
-0,075+0,045mm	Gibbsita	46,75	0,00	0,00	50,83	0,62	0,00	0,00	0,00	0,00	1,48
	Goethita	26,96	0,00	0,00	7,15	2,02	0,00	0,00	0,00	0,00	63,87
-0,045+0,027mm	Gibbsita	44,26	0,00	0,00	45,92	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	9,12
-0,027+0,019mm	Gibbsita	46,71	0,00	0,00	50,64	1,06	0,00	0,00	0,00	0,00	1,59
	Caulinita	49,34	0,00	0,00	26,54	22,07	0,00	0,00	0,00	0,00	2,05
-0,019+0,014mm	Gibbsita	46,80	0,00	0,00	51,68	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	1,06
	Caulinita	45,92	0,00	0,00	22,72	19,61	0,00	0,00	0,00	0,00	11,74
-0,014+0,010mm	Gibbsita	46,50	0,00	0,00	51,04	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00
	Goethita	26,35	0,00	0,00	7,93	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	65,18
	Caulinita	48,16	0,00	0,00	25,16	21,26	0,00	0,00	0,00	0,00	5,42
-0,010+0,007mm	Gibbsita	46,73	0,00	0,00	51,15	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	1,38
	Caulinita	48,62	0,00	0,00	23,89	22,85	0,00	0,00	0,00	0,00	4,64

Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

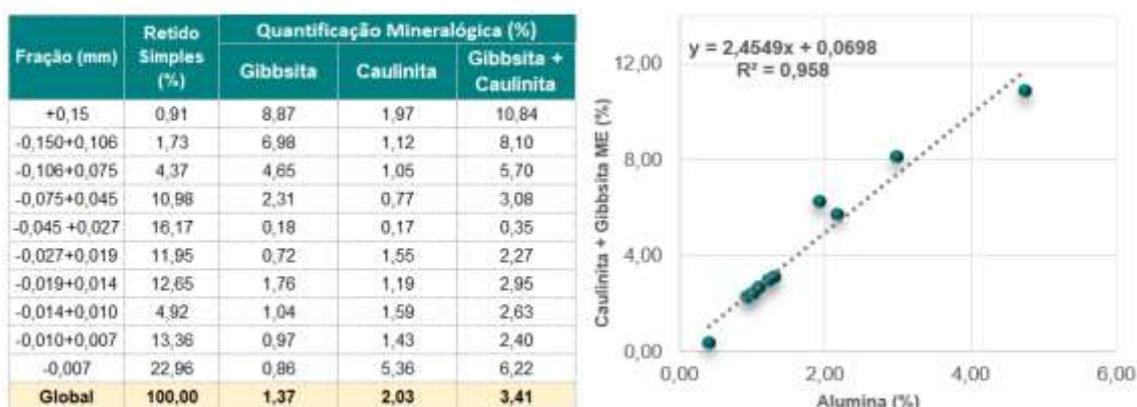
Para embasar a quantificação mineralógica, foi aplicada a técnica difração de raios X para a identificação dos minerais por faixa. A tabela a seguir apresenta estes resultados. Interessante notar que a difração de raios X apresenta valores próximos aos obtidos com a quantificação realizada pelo QEMSCAN, além de comprovar que na fração mais fina inferior a 0,027mm, o mineral portador de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  predominante é a caulinita.

Tabela 16 - Difração de raios X por faixa – Método de *Rietveld*.

Fração (mm)	Retido Simples (%)	Difração de Raios X - Método de Rietveld (%)					
		Goethita	Hematita	Óxido de Fe	Quartzo	Gibbsita	Caulinita
+0,15	0,91	17,82	55,37	73,19	14,93	8,19	<1
-0,150+0,106	1,73	14,24	61,26	75,50	6,80	6,61	2,94
-0,106+0,075	4,37	12,86	66,21	79,07	3,31	6,24	3,12
-0,075+0,045	10,98	16,26	69,90	86,16	1,03	6,17	1,68
-0,045 +0,027	16,17	13,65	81,31	94,96	0,89	0,10	2,97
-0,027+0,019	11,95	7,64	84,19	91,83	2,13	0,97	1,74
-0,019+0,007	30,93	9,28	80,55	89,83	1,63	1,53	2,68
-0,007	22,96	12,96	77,74	90,70	0,79	0,69	5,99
<b>Global</b>	<b>100,00</b>	<b>11,72</b>	<b>78,10</b>	<b>89,83</b>	<b>1,59</b>	<b>1,90</b>	<b>3,26</b>

Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

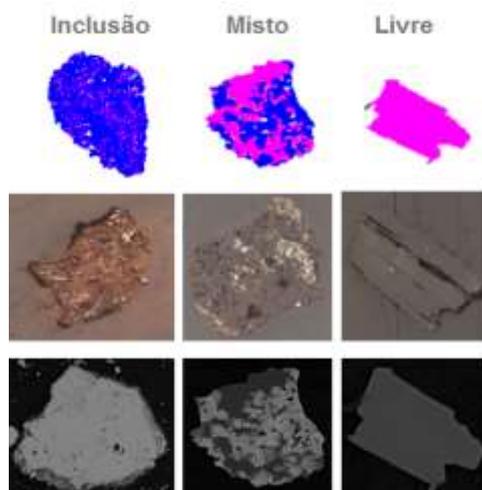
Verifica-se no gráfico e tabela a seguir elevada correlação entre a soma da caulinita e gibbsita identificada pela microscopia eletrônica de varredura automatizada. A significativa correlação apresenta que a soma desses minerais corresponde a fonte predominante de  $Al_2O_3$ , e conforme dito anteriormente, como ambos tem o mesmo comportamento, não irá afetar discussões e conclusões do estudo

Tabela 17 - Distribuição dos minerais portadores de  $Al_2O_3$  – Correlação entre o teor de  $Al_2O_3$  e os minerais aluminosos – QEMSCAN.

Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

O QEMSCAN permite a obtenção de espectros de liberação e possui um *software* que tem um algoritmo para a correção do viés estereológico. A determinação da liberação por classe foi dada considerando 3 classes: inclusão, misto e livre. A figura a seguir apresenta estas 3 classes.

Figura 33: Tipos de liberação por classe.



Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

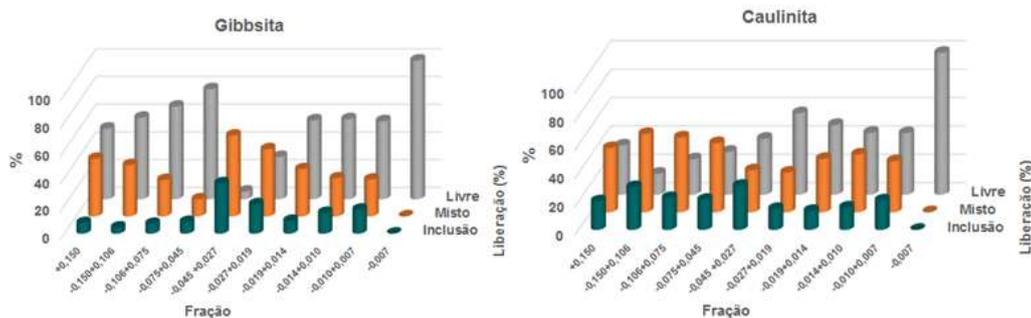
A tabela e gráficos a seguir apresentam a liberação por classe das amostras da barragem do gelado. Verifica-se que com exceção da fração passante em 0,007mm, nas demais faixas a liberação em média fica próxima de 50% para a gibbsita e 30% para a caulinita. Demonstrando que grande parte desses minerais se encontra associada a outro mineral.

Tabela 18 - Espectro de Liberação da gibbsita e caulinita.

Amostra	Fração (mm)	Retido Simples (%)	Liberação por Classe (%) - Gibbsita			Liberação por Classe (%) - Caulinita		
			Inclusão	Misto	Livre	Inclusão	Misto	Livre
Gelado	+0,150	0,91	8	42	51	20	45	35
	-0,150+0,106	1,73	4	37	59	30	55	15
	-0,106+0,075	4,37	7	26	67	22	53	25
	-0,075+0,045	10,98	8	12	79	21	49	30
	-0,045 +0,027	16,17	36	58	5	31	30	39
	-0,027+0,019	11,95	21	48	30	15	28	57
	-0,019+0,014	12,65	9	34	57	13	38	49
	-0,014+0,010	4,92	15	27	58	16	41	44
	-0,010+0,007	13,36	17	27	56	21	36	43
-0,007	22,96	0	0	100	0	0	100	

Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

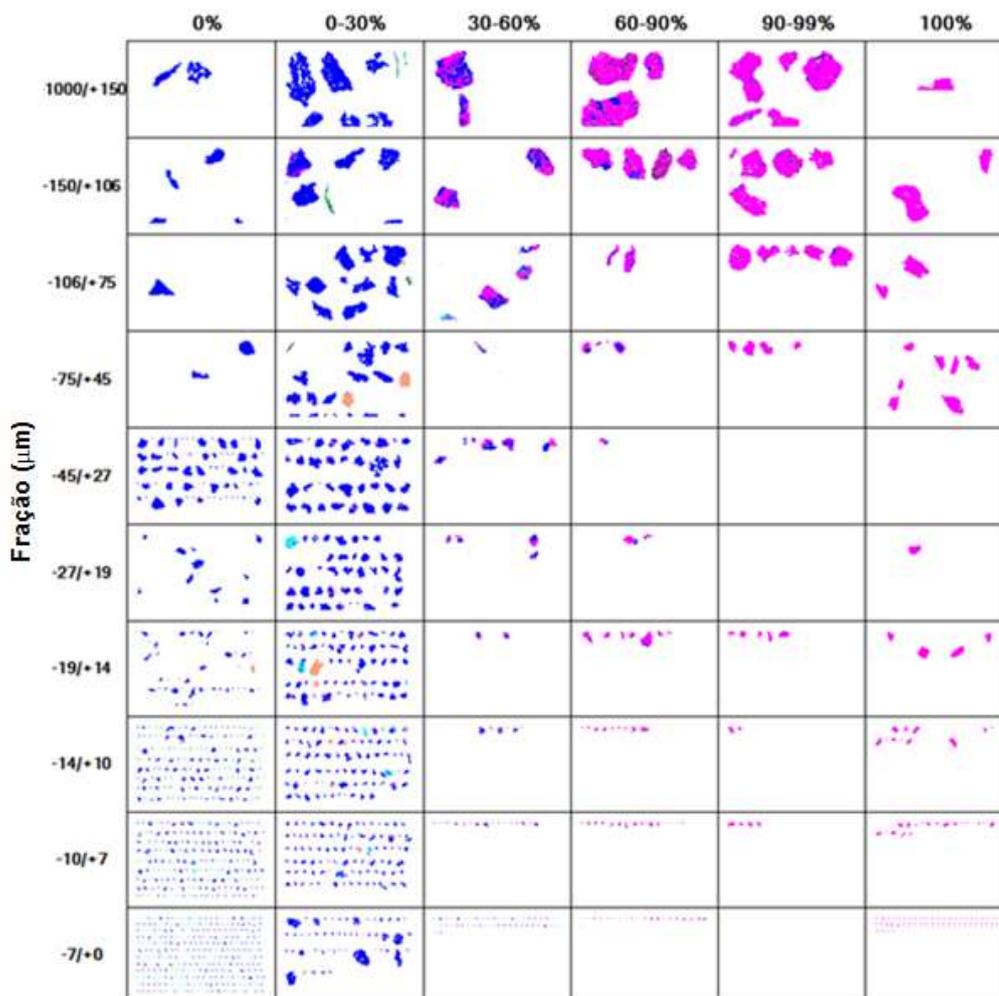
Figura 34: Gráfico do espectro de liberação da gibbsita e caulinita.



Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

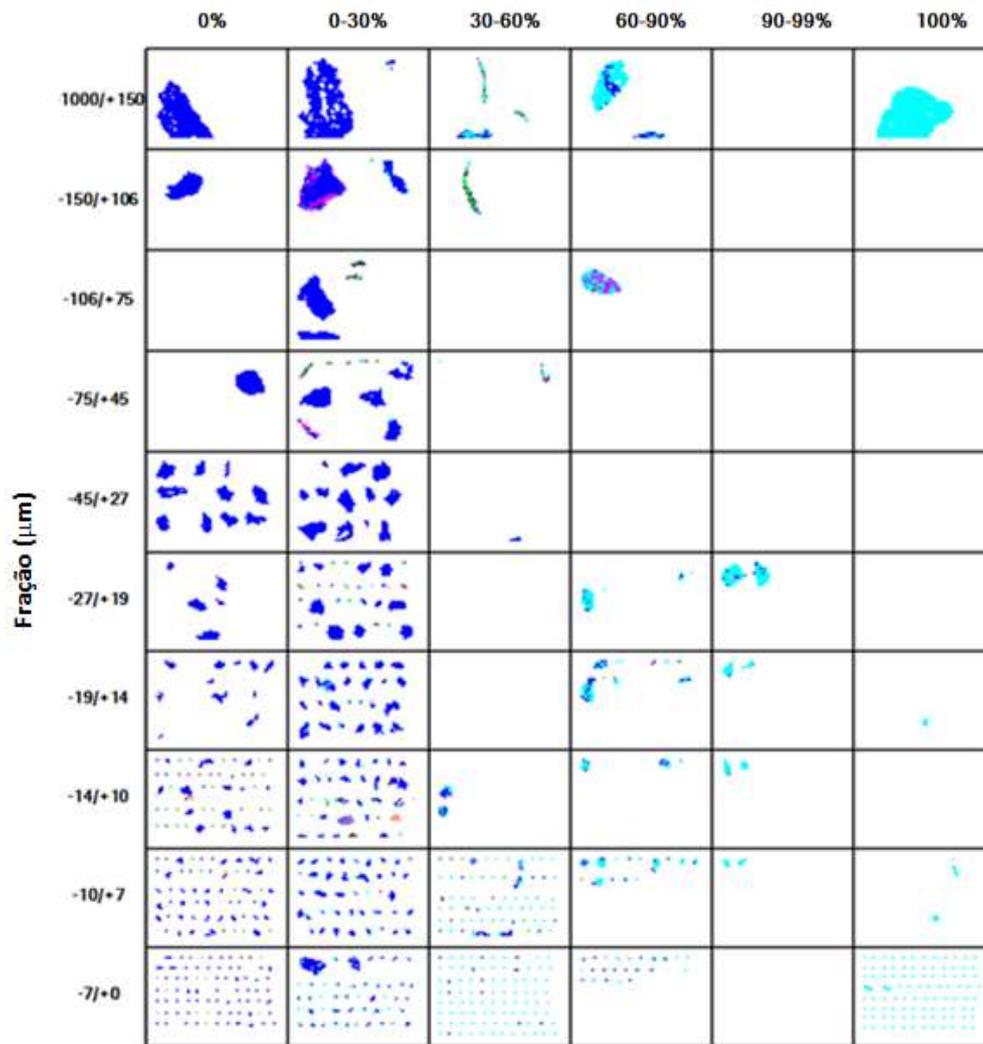
Os gráficos (Figuras 34 e 35) a seguir apresentam o espectro de liberação dos minerais caulinita e gibbsita. Interessante notar como as partículas aparecem associadas em cada faixa de liberação.

Figura 35: Espectro de Liberação da gibbsita.



Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

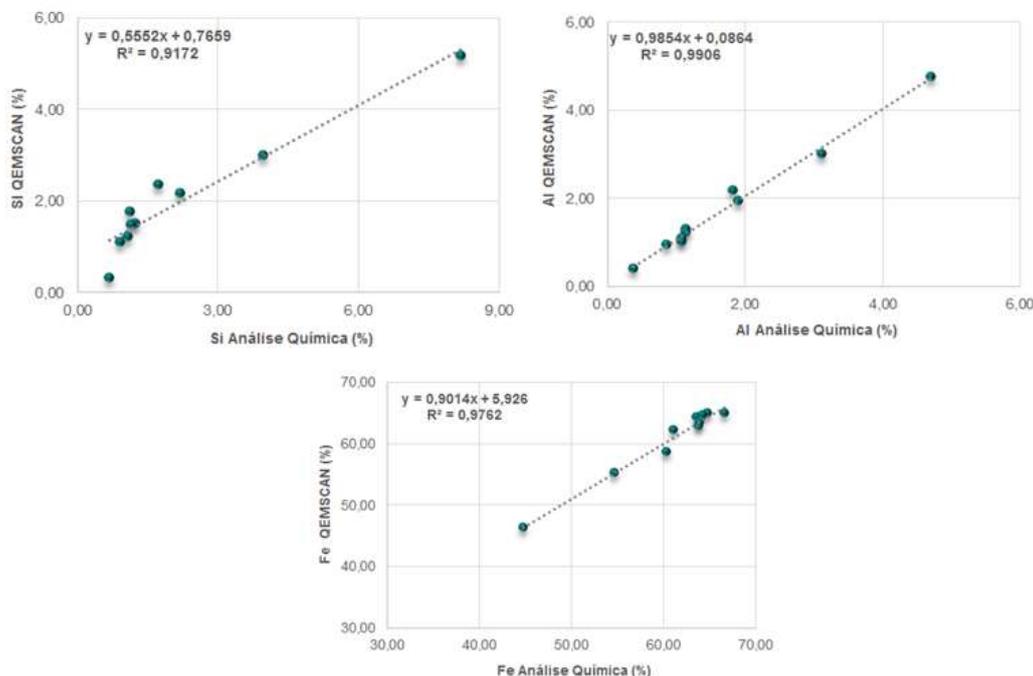
Figura 36: Espectro de Liberação da caulinita.



Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

Os gráficos (Figura 37) a seguir representam a aderência dos elementos químicos obtidas via análise química do laboratório e QESMCAN. Verifica-se elevada correlação entre eles.

Figura 37: Gráfico da correlação entre os elementos químicos obtidos via laboratório e QEMSCAN.



Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

## 9.2 Simulação de redução de $Al_2O_3$ aplicando um corte perfeito em 0,106mm, 0,019mm e 0,010mm

Conforme apresentado na caracterização inicial, verifica-se que os maiores teores de  $Al_2O_3$  da amostra da barragem do gelado, encontra-se nas frações acima de 0,106mm e 0,010mm. Sendo assim uma simulação de um corte perfeito nestas frações foi realizada, para avaliar os teores obtidos após este processo. Percebe-se que ao retirar toda a fração passante em 0,010mm, teoricamente é possível reduzir o teor de alumina de 2,70% para 2,17%. Já ao remover a fração mais grossa, >0,106mm, o percentual de redução seria de apenas 5%. Quanto a retirada de toda a fração abaixo de 0,019mm, possivelmente reduziria 24% no teor de  $Al_2O_3$ . Salienta-se que estas avaliações têm coerência, pois mesmo o teor de  $Al_2O_3$  sendo elevado na fração acima de 0,106mm, a maior parte deste deletério encontra-se nas frações mais finas.

Tabela 19 - Simulação do corte perfeito para redução de  $Al_2O_3$  – Amostras barragem do gelado

Amostra	Fração (mm)	Retido Simples (%)	Análise Química (%)										
			Fe	$SiO_2$	P	$Al_2O_3$	Mn	$TiO_2$	CaO	MgO	PPC		
Gelado Grande Volume	+0,15	0,91	44,74	17,51	0,046	8,89	1,282	0,304	0,054	0,184	6,65		
	-0,150+0,106	1,73	54,66	8,51	0,044	5,89	0,855	0,211	0,026	0,140	5,07		
	-0,106+0,075	4,37	60,34	4,68	0,038	3,46	0,705	0,177	0,019	0,062	3,77		
	-0,075+0,045	10,98	63,81	2,66	0,033	2,17	0,546	0,135	0,018	0,031	2,77		
	-0,045+0,027	16,17	66,61	1,44	0,028	0,85	0,409	0,098	0,020	0,081	1,45		
	-0,027+0,019	11,95	64,81	1,98	0,031	1,93	0,505	0,156	0,020	0,073	2,21		
	-0,019+0,014	12,65	63,64	2,44	0,035	2,55	0,518	0,173	0,021	0,092	2,45		
	-0,014+0,010	4,92	63,90	2,39	0,034	2,42	0,514	0,181	0,023	0,102	2,37		
	-0,010+0,007	13,36	64,27	2,29	0,035	2,41	0,528	0,184	0,022	0,100	2,19		
-0,007	22,96	61,11	3,71	0,060	4,28	0,805	0,254	0,023	0,088	3,54			
Global	100,00	62,77	3,02	0,048	2,70	0,701	0,199	0,020	0,052	3,03			
Corte em 0,106mm	Corte em 0,106mm	97,36	63,65	2,62	0,039	2,57	0,579	0,175	0,021	0,080	2,57	Percentual de Redução de Alumina (%)	
Corte em 0,019mm	Corte em 0,019mm	46,11	64,00	2,76	0,032	2,04	0,529	0,138	0,020	0,069	2,42		5
Corte em 0,010mm	Corte em 0,010mm	63,68	63,92	2,67	0,033	2,17	0,525	0,148	0,021	0,076	2,42		24
Corte em 0,106mm e 0,010mm	Global	61,04	64,47	2,28	0,032	1,97	0,505	0,144	0,020	0,073	2,28		20
												27	

Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_CPT – Vale (2017).

### 9.3 Teste piloto de concentração magnética

O estudo de redução de teor de  $Al_2O_3$  contemplou a realização de concentração magnética da amostra da barragem do gelado. No estudo, buscou-se obter na concentração magnética diferentes recuperações para avaliar como seria a redução da  $Al_2O_3$  no concentrado. Os ensaios foram realizados no equipamento Micromag de alta intensidade do Centro de Pesquisas Tecnológicas (APÊNDICE 2). Variou-se a intensidade do campo magnético, a abertura (gap) e a vazão de água de lavagem do médio, em busca de maximizar a remoção dos minerais portadores de  $Al_2O_3$ . Na tabela 20, ao analisar os ensaios com percentual de sólidos acima de 40%, com gap de 1,5mm e 3,8mm, para uma recuperação mássica semelhante ao de projeto, próximo a 57%, verifica-se que o gap de 1,5mm fornece maior redução da  $Al_2O_3$ , sendo igual a 50%. Já para o teste com o gap de 1,5mm, na maior recuperação mássica de 74%, é possível obter um teor de  $Al_2O_3$  de 1,77%. Outro ponto observado foi a redução de  $Al_2O_3$  em até 61%, quando alimentada a concentração magnética com percentual de sólidos em 28,71%, entretanto, ocorre perda significativa da recuperação mássica e consequentemente menor produtividade dos concentradores magnéticos.

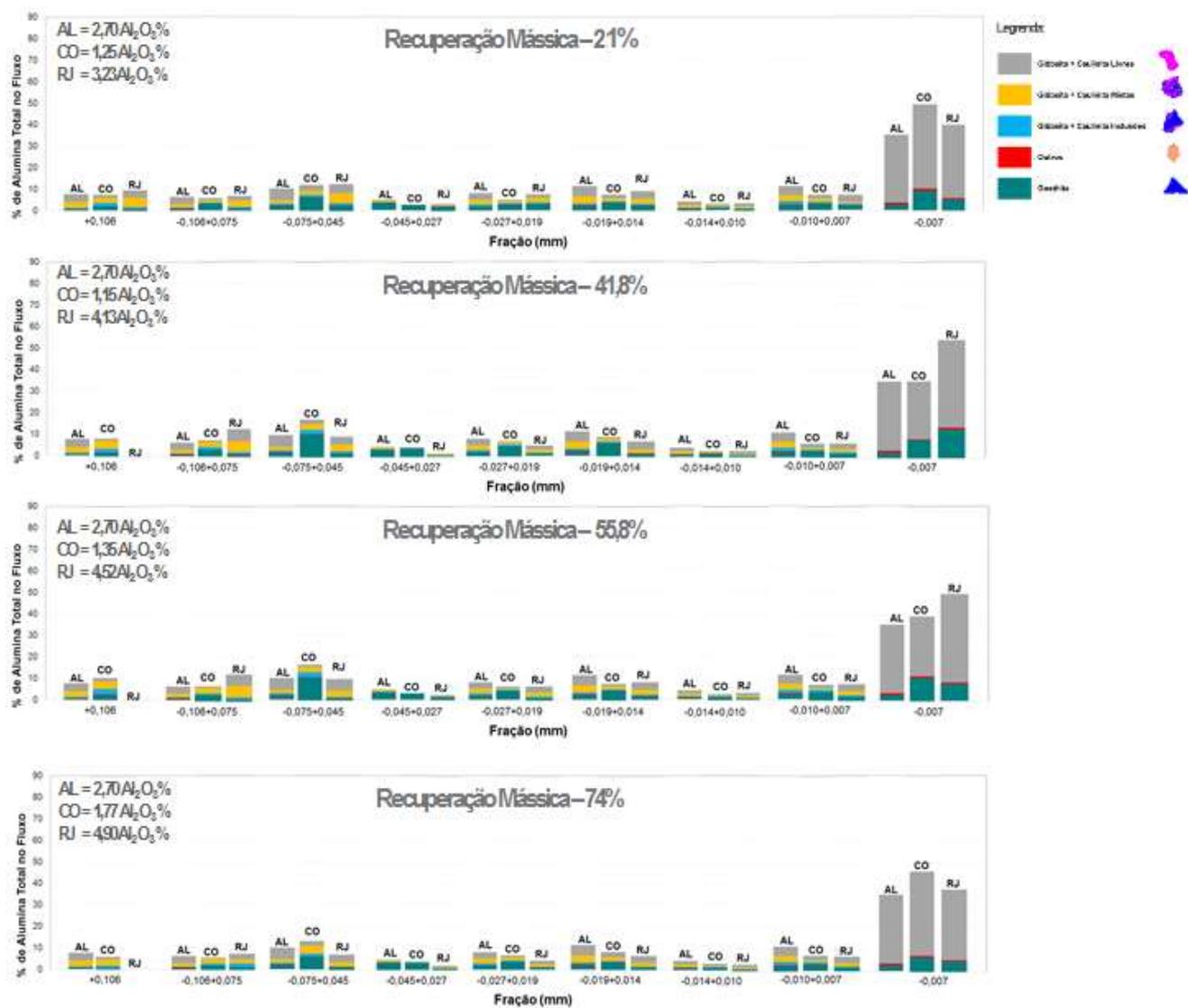
**Tabela 19 – Teste da redução de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> via concentração magnética – Referência de concentrado, médio e rejeito**

Teste	GAP (mm)	campo (Gauss)	Pressão Água MQ (kg/cm <sup>2</sup> )	Alimentação				Recuperação Massa (%)	Concentrado				Recuperação Massa (%)	Rejeito				Recuperação Massa (%)	Porcentual de Redução de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Superfície Específica (cm <sup>2</sup> /g)	Direcionamento do Meio	
				solúdo (%)	Análise Química (%)				solúdo (%)	Análise Química (%)				solúdo (%)	Análise Química (%)							
				Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				
1	1,50	4.540	1,00	43,20	62,77	3,02	2,70	100,00	3,02	66,14	1,65	<b>1,26</b>	<b>21,10</b>	5,01	61,77	3,49	3,23	78,90	54	2.052	Rejeito	
2	1,50	11.170	1,00	46,60	62,77	3,02	2,70	100,00	4,08	66,37	1,38	<b>1,16</b>	<b>41,78</b>	5,20	59,55	4,57	4,13	58,22	57	1.407	Rejeito	
3	1,50	11.170	0,00	43,75	62,77	3,02	2,70	100,00	2,70	65,90	1,58	<b>1,35</b>	<b>55,76</b>	3,90	59,35	4,60	4,52	44,24	50	1.922	Rejeito	
4	1,50	11.170	1,00	43,60	62,77	3,02	2,70	100,00	5,80	64,68	2,01	<b>1,77</b>	<b>73,96</b>	6,20	59,91	4,80	4,90	26,04	34	2.303	Concentrado	
5	1,50	11.170	0,00	28,71	62,77	3,02	2,70	100,00	3,70	68,65	1,11	<b>1,65</b>	<b>47,89</b>	0,88	59,54	4,41	4,08	52,11	61	-	Rejeito	
6	1,50	11.170	1,00	28,71	62,77	3,02	2,70	100,00	3,10	66,23	1,30	<b>1,20</b>	<b>50,34</b>	12,79	59,54	4,68	4,32	49,66	56	-	Concentrado	
7	3,00	3.040	1,00	43,82	62,77	3,02	2,70	100,00	2,22	65,71	1,73	<b>1,30</b>	<b>50,34</b>	20,07	61,95	3,44	3,18	81,73	52	2.005	Rejeito	
8	3,00	7.810	1,00	46,71	62,77	3,02	2,70	100,00	4,14	69,27	1,41	<b>1,11</b>	<b>38,57</b>	13,34	60,50	3,80	3,65	61,43	59	1.403	Rejeito	
9	3,00	7.810	1,00	44,00	62,77	3,02	2,70	100,00	4,92	65,36	1,84	<b>1,67</b>	<b>56,68</b>	22,39	59,70	4,45	4,02	43,32	42	2.227	Concentrado	

Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_CPT – Vale (2017).

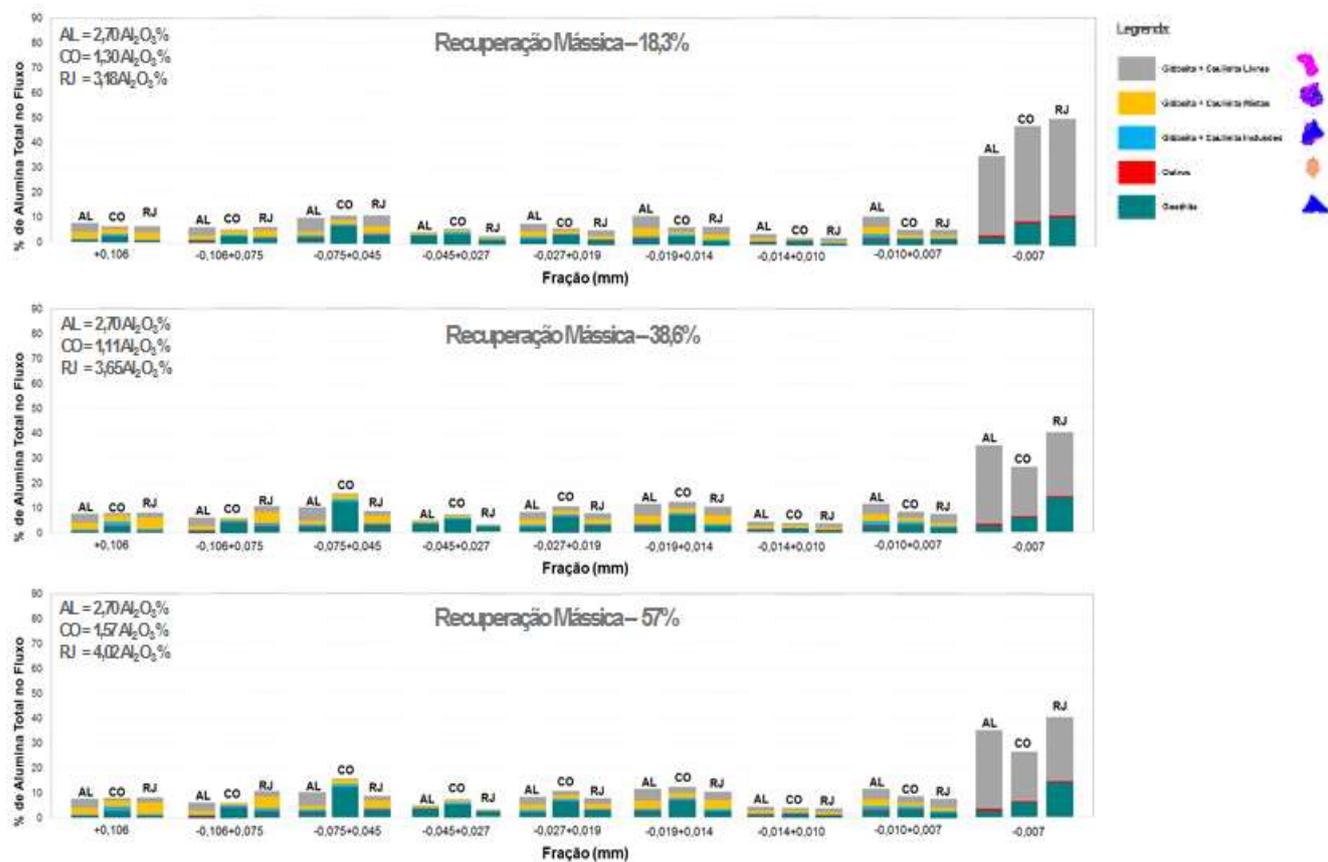
Para a alimentação e produtos da concentração magnética também foi investigado como o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> estava distribuído e os resultados são apresentados a seguir. Nestes ensaios não se observou uma tendência de algum tipo de partícula específica ser direcionada para algum fluxo ou fração preferencial. O concentrado ainda permaneceu com quantidade significativa de partículas com granulometria inferior a 0,007mm.

Figura 38: Gráfico da distribuição da  $Al_2O_3$  – Concentração magnética, gap 1,5mm - Global.



Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_CPT – Vale (2017).

Figura 39: Gráfico da distribuição da  $Al_2O_3$  – Concentração magnética, gap 3,8mm - Global.



Fonte: Relatório Técnico – RT N0430\_Pelotização São Luis\_ CPT – Vale (2017).

## 10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A maior concentração de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  encontra-se principalmente nas frações acima de 0,106mm, decresce até a faixa de 0,027mm, e eleva-se novamente nas frações mais finas. Este mesmo comportamento é observado com o P,  $\text{SiO}_2$ , Mn e  $\text{TiO}_2$ . Os deletérios CaO e MgO não são significativos. Cerca de 50% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  encontra-se na fração passante em 0,010mm. Em relação a superfície específica, as amostras apresentam valores próximos de  $3.242\text{cm}^2/\text{g}$ .

A quantificação mineralógica indica que os principais minerais portadores de Fe são as hematitas compactas e todas as amostras apresentam certo grau de hidratação com presença de goetitas (compacta e terrosa). A gibbsita predomina nas frações mais grossas, decresce até a fração 0,027mm e ocorre uma inversão, no passante desta faixa, sendo que, a principal fonte de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  torna-se a caulinita.

As partículas tendem a se tornar liberadas de gibbsita e caulinita a partir da fração passante em 0,007mm.

Na concentração magnética, a redução do teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  no concentrado foi mais significativo com o campo magnético de 11.170 Gauss, gap de 1,5mm, sem o uso da água de médio e o direcionamento do médio para o rejeito e percentual de sólidos na alimentação de 43,75%, gerou 56% de recuperação mássica, sendo possível obter um teor de Fe de 65,96%,  $\text{SiO}_2$  de 1,58% e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 1,35%, atendendo a especificação máx. 1,5% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Já o teste com o mesmo campo magnético e gap, uso de  $1\text{kgf}/\text{cm}^2$  de água de médio, direcionamento do médio para o concentrado e percentual de sólidos de 43,60% na alimentação, obteve-se 73,96% de recuperação mássica, o teor de Fe de 64,88%,  $\text{SiO}_2$  2,01% e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 1,77%.

A partir da alimentação da concentração magnética com percentual de sólidos próximos de 29%, ocorreu maior redução de até 61% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  contido no concentrado, porém, com maior impacto na recuperação mássica, quando comparada as alimentações da concentração magnética com percentual de sólidos acima de 40%. A redução do percentual de sólidos pode ter promovido pela redução da viscosidade da polpa pelo

menor aporte de sólidos no fluxo de alimentação, contribuindo desta forma para o aumento da remoção dos minerais portadores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , gibbsita e caulinita.

A redução do teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  está fortemente relacionado ao percentual de partículas liberadas de gibbsita e caulinita.

## 11 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Testar o produto gerado no médio e rejeito da concentração magnética na fabricação de briquete, de forma a evitar o retorno do material para a barragem do gelado.
  
- ✓ Testar diferentes percentuais de *bypass* da polpa oriunda da barragem do gelado, juntamente com o minério de ferro beneficiado via peneiramento à úmido da usina I, direcionando-os para às filtragens disco e prensa sem passar pela concentração magnética.
  
- ✓ Testar a ciclonagem do concentrado da concentração magnética ou da polpa do *under* do espessador da Usina V, de forma a retirada dos minerais livres, portadores de  $Al_2O_3$ .

## REFERENCIAS

BRETAS, R. E. S & D'AVILA, M. A. – **Reologia de Polímeros Fundidos**. Editora da UFSCar, 2000.

CHAVES, A.P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. Editora Signus, vol. 1, 235p, 1996.

CHAVES, A. P. **Pelotização de Minérios de Ferro**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

CNT – Confederação Nacional dos Transportes. **Pesquisa Aquaviária – Portos Marítimos: Longo Curso e Cabotagem**. Brasília: Confederação Nacional do Transporte. Disponível em: <http://www.cnt.org.br>, 2006.

Depto. Eng. Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. **Processos de Aglomeração de Minérios**. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/83761/mod\\_resource/content/1/aglomera%2B%C2%BA%2B%C3%BAo%202013.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/83761/mod_resource/content/1/aglomera%2B%C2%BA%2B%C3%BAo%202013.pdf). Acesso em: 11 jul. 2023.

FRANCOIS-BONGARÇON, D. ‘& GY, P. Critical Aspects in Mill and Plants: A Guide to Understanding Sampling Audits. In: **Journal of the South African IMM**, vol. 102, no 8, África do Sul, 2002.

GY, P. **Sampling of Particulate Metrials – Theory and Praticce**. Amsterdam: Elsevier, 1982.

GY, P.M. **Sampling for Analytical Purposes**. 1st. ed., translated by A.G. Royle, John Wiley & Sons, West Sussex, Inglaterra, 153 p, 1998.

GUPTA, A.; SRINIVASAN, M. Pelletization of Iron Ores and the Type of Wear Coating on Reactor Wall of Low Cement Castable. In: **Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Materials Research and Manufacturing Technologies** (pp. 59-67). Springer, 2019.

HALLIDAY, D; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentals of Physics**. Vol. 3. 8 ed. Tradução: Denise Helena da Silva Sotero e Gerson Bazo Costamilan. Editora LTC, 350p, 2009.

HJARTLAND, T.; MJELDE, M. Electrokinetic-enhanced sediment removal in harbours: The importance of accurate site characterisation. **Journal of Environmental Management**, 246, 555-562, 2019.

LIMA, L. R. P.; CHAVES, A. P.; SOUZA, M. V. de. (2012). Separação magnética a úmido na mineração: descrição e análise crítica de aplicação. **REM: Revista Escola de Minas**, 65(2), 181-186.

LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. de. **Tratamento de Minério**. 4ªed. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2004. 305-335p.

MCGRAIL, S.; HARNETT, D. Case Study of Electric Dredging for Coastal Erosion Control. In: **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering**, 172(4), 235-241, 2019.

**NBR ISO 3082:2010** – Minérios de ferro – Procedimentos de amostragem e preparação de amostras.

KING, R. P. The Prediction of Mineral Liberation from Mineralogical Texture. In: **International Mineral Processing Congress**,14, Toronto, 1982.

KRONTIRIS, T. G.; MULLIGAN, R. P. (Eds.). **Dredging for Sustainable Infrastructure**. Taylor & Francis, 2020.

PAULA, N. N. (2009) **Treinamento de Concentração Magnética Convencional Aplicada em Minério de Ferro**. Vale, Belo Horizonte-MG.

PAWLIK, M.; LASKOWSKI, J. S. Evaluation of Flocculants and Dispersants Through Rheological Tests. In: *Polymers in Mineral*. **38th Annual Conference of Metallurgists of CIM**, Quebec, Canada, p. 541-55, August, 1999.

PIETSCH, Wolfgang. **Size Enlargement by Agglomeration**. New York: John Wiley & Sons, 1991.

PITARD, F. F. **Pierre GY's Sampling Theory and a Sampling Parctice: Heterogenety, Sampling Correctness, and Statistical Process Control**. 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton, Florida, Estados Unidos, 1993.

POSSA, M. V.; NASCIMENTO, C. R. **Reologia no Tratamento de Minérios**. In: LUZ, A.; SAMPAIO, J.; FRANÇA, S. *Tratamento de minérios*. 5ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p 597-634, 2010.

QUEIROZ, L. A. (2005) **Treinamento de Mineralogia. Interpretação Mineralógica Aplicada em Definição de Rota de Processo de Minério de Ferro**. Vale, Mariana-MG.

ROCHA, R. B. **Concentração de Rejeito de Flotação e Lamas de Minério de Ferro por Separação Magnética**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B. **Separação Magnética e Eletrostática**. In: Luz, A. B.; Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (Ed.). *Tratamento de minérios*. 4a ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 303-335, 2004.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; LUZ, A. B. **Ensaio de Separação Magnética e Eletrostática**. In: Sampaio, J.A.; França, S.C.A.; Braga, P.F.A. *Tratamento de minérios: práticas laboratoriais*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, cap. 18, p. 319-348, 2007.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; GONZAGA, L. M. (2018). **Separação magnética e eletrostática**. In: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. Tratamento de minérios. 6ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC.

SANTOS, Breno Augusto dos. **AMAZONIA: Potencial Mineral e Perspectivas de Desenvolvimento**. São Paulo. T. A. Queiroz: Ed. da Universidade de São Paulo, 1981.

SHAO, F., Li, Y., & Sun, Z. (1996). Modeling and Calculation of Magnetic Fields of Superconducting Magnetic Separators for Mineral Processing. **IEEE Transactions on Magnetics**, 32(5), 4306-4310.

SHUMAN, D. P., & COMER, K. An Introduction to Electro-Dredging for Silt and Sludge Removal. **Journal of Soil and Water Conservation**, 67(6), 149A-154A, 2012.

SUTHERLAND, J., & FREITAS, R. **Fundamentals of Dredging Engineering**. CRC Press, 2008.

SVOBODA, J. The effect of magnetic field strength on the efficiency of magnetic separation. **Minerals Engineering**. v.7, p. 747-757. 1993.

SVOBODA, J., FUJITA, T. **Magnetic Techniques for the Treatment of Materials**. Springer Science & Business Media, 2003.

SVOBODA, J. **Magnetic Techniques for the Treatment of Materials**. Minerals Engineering. Springer, Dordrecht, 2004.

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

VALE S/A. Livro 3 – **Concentração Magnética, Flotação e Reagentes**. Diretoria Engenharia e Gestão de Ativos, PTP - 000749, Rev.: 05 – 13/05/2020.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. **Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. 7. ed. Oxford: Elsevier, 2006.

## APÊNDICES

## APÊNDICE 1 – METODOLOGIA DE ANÁLISE MINERALÓGICA VIA QEMSCAN

O QEMSCAN® (*Quantitative Evaluation of Materials by Scanning Electron Microscopy*) é um sistema de software e hardware que possibilita a automatização do microscópio de varredura de feixe de elétrons (MEV). Com este equipamento é possível obter informações complementares sobre presença de minerais de ganga tais como a presença de fosfatos, carbonatos, entre outros. Além de tornar a caracterização mineralógica mais completa, o equipamento permite gerar inúmeros tipos de informações, tais como gráfico de associações, mapas mineralógicas de como as partículas estão associadas e principalmente o espectro de liberação do mineral.



Figura A: QEMSCAN.

### PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O equipamento possui uma coluna de alto vácuo, onde os elétrons são gerados a partir de um filamento de tungstênio, por efeito termiônico, e acelerados por uma diferença de potencial entre catodo e anodo. O feixe gerado passa por lentes condensadoras que reduzem o seu diâmetro e por uma lente objetiva que o focaliza sobre a amostra.

O feixe interage com a região de incidência da amostra até uma profundidade que pode variar de 1  $\mu\text{m}$  a 6  $\mu\text{m}$ , dependendo da natureza da amostra. Esta região é conhecida por volume de interação, o qual gera os sinais que são detectados e utilizados para a formação da imagem e para microanálise. As formas de colisão do feixe eletrônico no alvo dão-se em diferentes níveis energéticos devido às variações das colisões ocorridas. Como existem várias formas possíveis de colisão devido à angulação de trajetória, o elétron não chega a perder a totalidade da energia adquirida num único choque, ocorrendo

então a geração de um amplo espectro de radiação cuja gama de frequências é bastante larga, ou com diversos comprimentos de onda. Os principais tipos de interações são:

#### **Interações elásticas (sem perda de energia)**

- Elétrons primários defletidos: elétrons retroespalhados
- Elétrons primários transmitidos

#### **Interações inelásticas (com perda de energia)**

- Radiação de frenamento (Bremsstrahlung): raios X contínuos
- Emissão de elétrons (ionização): elétrons secundários
- Emissão de radiação característica: raios X
- Emissão de elétrons por efeito Auger

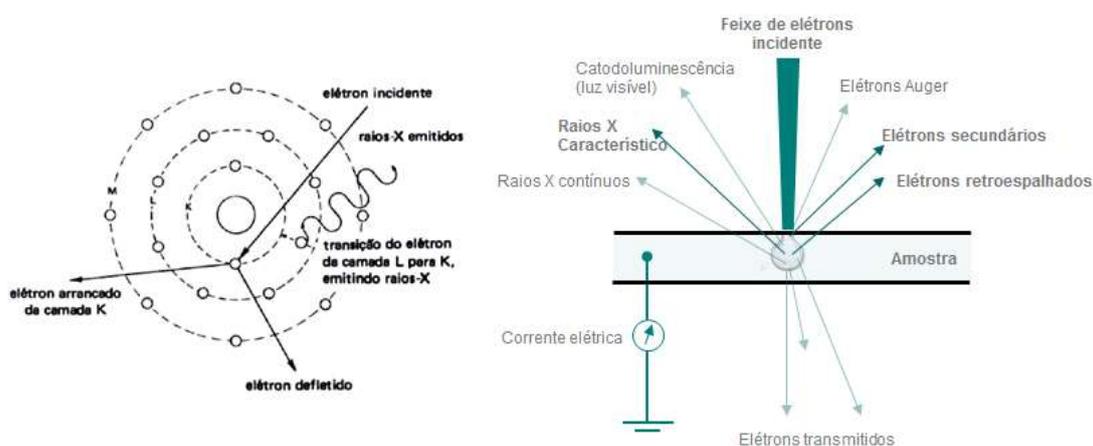


Figura B: Desenhos esquemáticos das interações entre o feixe de elétrons e a amostra.

No QEMSCAN há um conjunto de detectores para captar os sinais de elétrons retroespalhados (BSE), elétrons secundários (SE) e de energia dispersiva de raios X (EDS). A figura a seguir apresenta um desenho esquemático.

### **PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS**

A preparação das amostras inicia com a divisão das alíquotas destinadas à análise mineralógica utilizando micro divisor rotativo. O embutimento das partículas é realizado em resina poliéster ortoftálica (viscosidade de 0,36 Pa.s a 25°C e massa específica de 1,10 a 1,15g/cm<sup>3</sup>), aplicando-se cobalto (1 gota, para endurecimento), catalisador (2 gotas, para aceleração do processo de endurecimento) e acetona (3 gotas, se necessário para evitar a formação de bolhas). As seções polidas obrigatoriamente devem ter 30 mm de diâmetro

para que possam ser inseridas no porta amostra do QEMSCAN. A cura das seções é realizada em estufa com temperatura próxima a 105 °C e o polimento é executado na politriz automática da Struers Tegramin-30 utilizando-se lixas número 80, 100, 220, 400 e 600 e pasta de alumina de 1 µm, finalizado com pano terbrim.

Devido à necessidade de interação do feixe eletrônico com a amostra, alguns elétrons são absorvidos pela amostra que deve conduzi-los para o fio terra, assim, é preciso que as amostras sejam condutoras. Caso isto não ocorra, é possível torná-las condutoras através de vários processos físicos como evaporação ou a deposição de íons. Outro motivo para o recobrimento das amostras, é que as camadas depositadas podem melhorar o nível de emissão de elétrons, pois emitem mais elétrons que o material da amostra, facilitando a construção da imagem (GOLDSTEIN et al.,1992).

As máquinas utilizadas para esta finalidade são comumente denominadas metalizadoras e oferecem como parâmetros de ajuste a corrente aplicada (em mA), tempo de deposição e altura da amostra em relação ao alvo, a fim de que seja calculada a espessura do metal depositado. No recobrimento a partir da evaporação, normalmente é utilizado o carbono. É importante ser criterioso com a preparação de amostras, pois uma seção polida com bolhas, camada errônea de carbono e distribuição granulométrica não adequada são situações que podem gerar análises incoerentes e resultados não precisos.

### **COMPONENTES DO QEMSCAN**

O QEMSCAN é composto por uma coluna ótica eletrônica na qual é produzido o feixe de elétrons. Dentro da coluna existem as bobinas eletromagnéticas de deflexão do feixe de elétrons, as lentes condensadoras responsáveis por colimar (alinhar) o feixe de elétrons, as bobinas que fazem a correção do astigmatismo e o canhão de emissão dos elétrons. A figura a seguir mostra a coluna do QEMSCAN e um desenho esquemático.

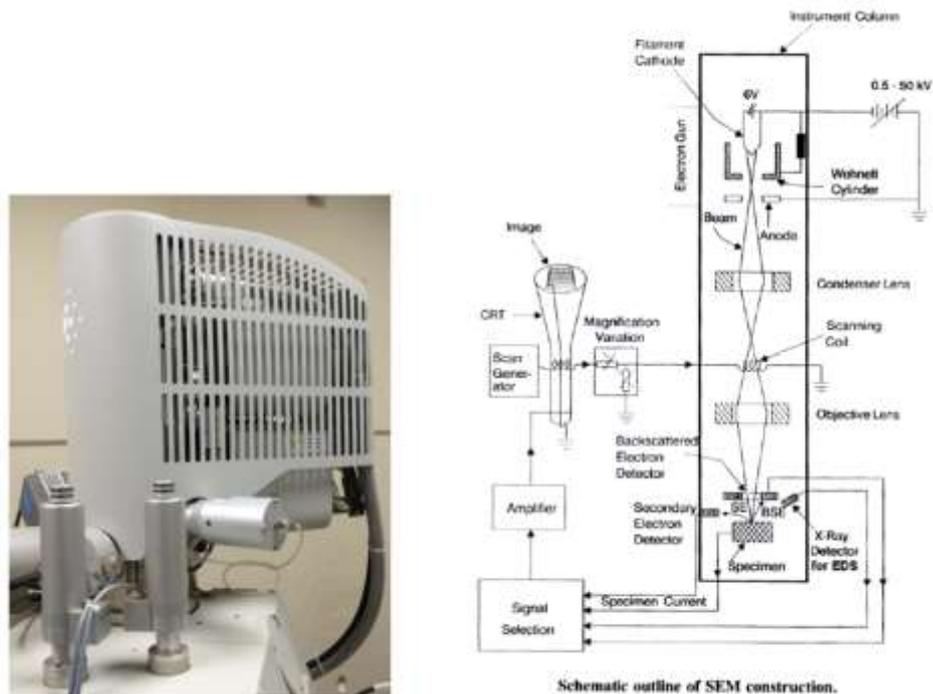


Figura C: Coluna do QEMSCAN.

O canhão de emissão de elétrons é do tipo FEG, esquematizado na figura a seguir, que utiliza uma agulha fina em W, com raio menor que 102nm, que emite elétrons através da aplicação de um forte campo elétrico em uma região altamente localizada. Para este tipo de filamento é necessário que a região do canhão seja mantida em condições de alto-vácuo.

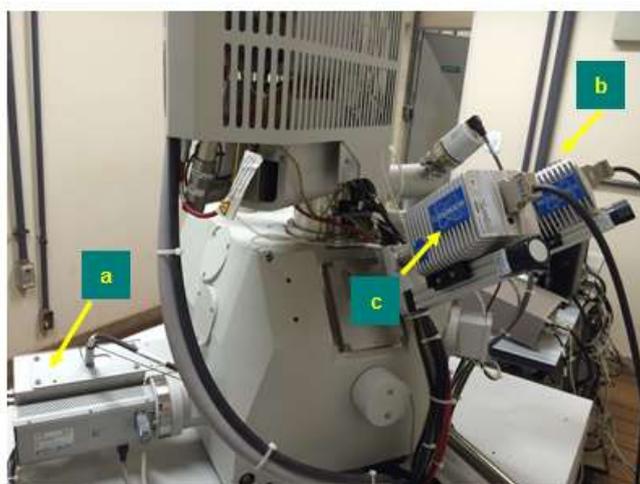


Figura D: Detectores (a) detector EDA, (b) detector SE e (c) detector de BSE.

A análise deve ser realizada a vácuo e a pressão aplicada é da ordem de  $10^{-6}$ Torr que para ser atingida são utilizadas um conjunto de bombas. Há, ainda, dois computadores sendo o PC 01 o computador no qual está instalado o software iMeasure que realiza a medição e quantificação mineral e o PC 02 é o computador no qual está instalado o software do microscópio. A figura a seguir ilustra o exposto.

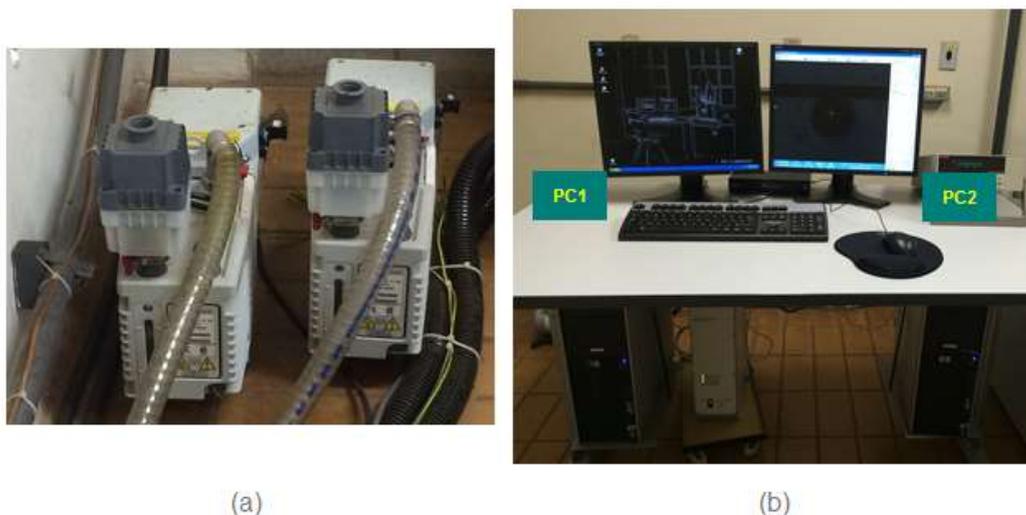


Figura E: (a) bombas de vácuo e (b) computadores.

## GERAÇÃO DE DADOS

A geração de imagem é realizada primeiramente pela coleta de imagens de elétrons retroespalhados (BSE) com discriminação de partículas e posterior coleta de espectros de raios X por EDS (espectrometria por dispersão de energia de raios x, um método de análise química elementar de pequenas regiões). Após a coleta é realizada a classificação das partículas. A identificação de um mineral ou fase particular em um ponto é obtida pela comparação imediata do espectro de raios X, coletado em aproximadamente 5 milissegundos, com os dados de uma tabela com minerais e fases definidos por sua composição química. A comparação dos espectros de raios X é realizada enquanto o próximo espectro é obtido na amostra, o que permite o processamento de cerca de 100.000 espectros em uma hora. A lista pré-definida de espécies minerais, conhecida como Programa de Identificação de Espécies (SIP - *Species Identification Program*), pode ser aprimorada ou corrigida. A imagem da seção da partícula é construída ponto a ponto desta forma, na qual cada pixel corresponde a uma espécie mineral, ou fase. Quando todas as partículas de um determinado campo de visão estão medidas o sistema posiciona o feixe

em um novo campo, repetindo o procedimento descrito acima. Logo a medida que ocorrer a classificação dos pixels, gera-se uma imagem digital da seção onde cada fase individualizada é representada por uma cor. Posteriormente, recursos de análise de imagens disponíveis no software permitem a obtenção de informações sobre as proporções de cada fase e suas respectivas formas de associação e liberação. A figura a seguir apresenta o método de aquisição de informações e a sequência de operação do QEMSCAN.

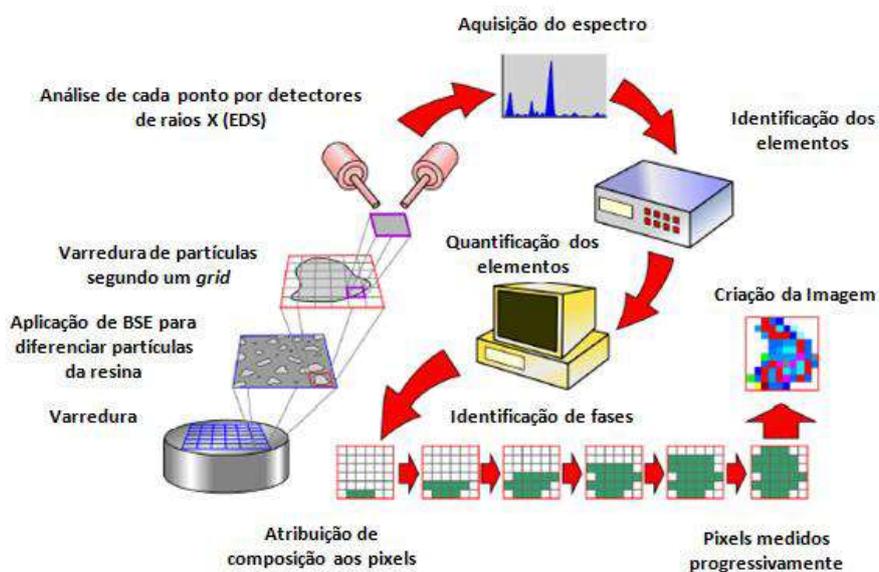


Figura F: Sequência de etapas da análise via QEMSCAN (Jaime et al; 2009).

## TIPOS DE ANÁLISE

O QEMSCAN apresenta diferentes tipos de varreduras da seção polida e podem ser aplicadas para qualquer tipo de medida realizada. A figura a seguir ilustra as opções.

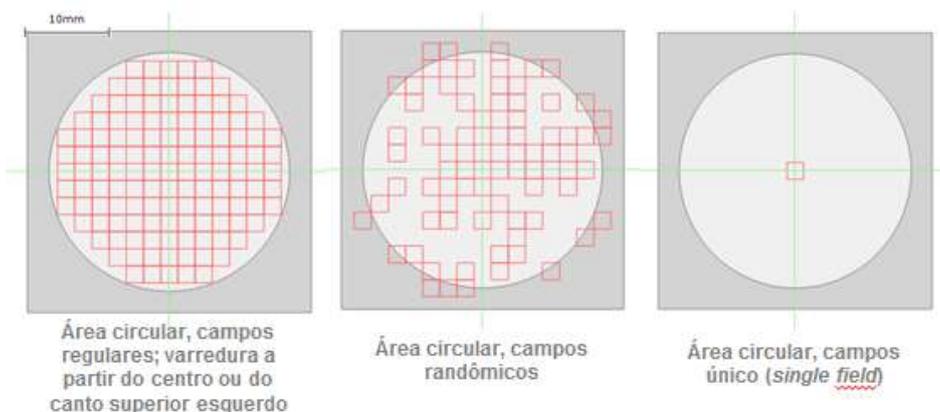


Figura G: Tipos de varreduras realizadas pelo QEMSCAN.

A seguir são apresentados os tipos de medidas mais utilizados pelo QEMSCAN que variam de acordo com a informação que deseja ser obtida na análise.

- **PMA (*Particle Mineral Analysis*):** medidas bidimensionais ou em área, individualizadas por partícula; produz imagens mineralógicas das partículas e fornece informação sobre composição, associação mineralógica, liberação e tamanho de partículas.
- **Field scan / field image:** captura uma imagem completa de cada campo, produzindo um mosaico de imagens mineralógicas que permite visualizar texturas e microestruturas, fornecendo informação sobre composição modal.
- **BMA (*Bulk Mineral Analysis*):** não captura imagens completas de cada campo, logo não produz um mosaico de imagens mineralógicas. Fornece apenas quantificação modal. Análise mais rápida e com menor nível de informações.

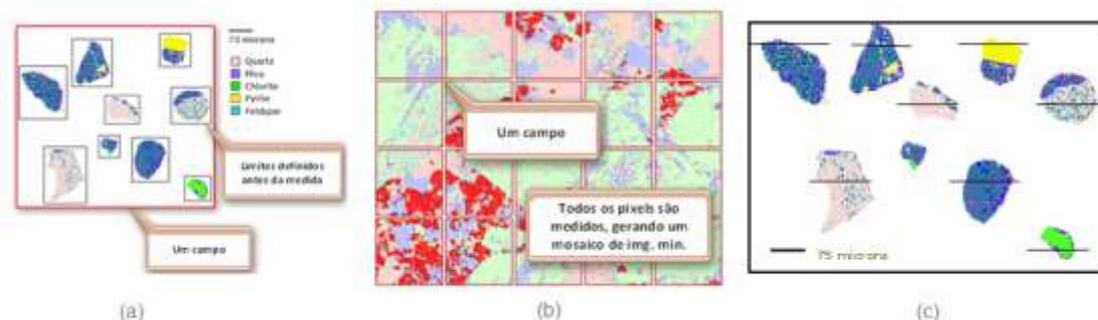


Figura H: Tipos de medidas: (a) PMA, (b) Field e (c) BMA.

## **Referências Bibliográficas**

BRANDÃO, P. R. G. **Notas de Aulas da Disciplina Métodos de Instrumentação e Análise** – Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I., MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura - Aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre 2007.

GOLDSTEIN, J.I., NEWBURY, D.E., ECHLIN, P, .JOY, D.C., ROMIG JR, A.D., LYMAN, C.E., FIORI, C., LIFSHIN, E. **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis**. 2nd Ed., Plenum Press, New York, 1992.

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**. Dissertação de Mestrado, PPGEM, Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

GOODHEW P.J., HUMPHREYS, F. J. **Electron Microscopy and analysis**. 2nd, Ed. Taylor & Francis, (1988).

FERREIRA, R. F. **Estudo de Liberação das Fases Minerais em Minérios de Ferro**. Dissertação de Mestrado, PPGEM, Universidade Federal de Ouro Preto, 2013.

METALS HANDBOOK - Ninth Edition, vol. 10, **Materials Characterization**. American Society for Metals (1986).

KESTENBACH, H. J.; W.J. BOTTA F., "**Microscopia Eletrônica: Transmissão e Varredura**". Associação Brasileira de Metais, 1989, 104pags. Re-edição Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 1994.

WILLIAMS, D. B. CARTER, B. **Transmission Electron Microscopy: a Textbook for Materials Science**. Plenum Press, New York, 1996.

## APÊNDICE 2 – CONCENTRADOR MAGNÉTICO MICROMAG (GAUSTEC)

É um concentrador eletromagnético de carrossel via úmido de alta intensidade de campo magnético (máximo de 18000 Gauss com GAP de 1,5 mm). Seu funcionamento é similar ao “*Minimag*”, possuindo os mesmos mecanismos de atuação, porém com menor capacidade de alimentação: máximo de 10 kg/h por ponto de alimentação versus 600 kg/h do “*Minimag*”. Outra diferença está associada à alteração da abertura do gap. No caso do “*Micromag*” substitui-se um rotor por outro e para o “*Minimag*”, troca-se somente a matriz. Quanto ao procedimento operacional, aciona-se o campo magnético, ajustando-o para um determinado valor. Prepara-se a polpa de minério num tanque em agitação com percentual de sólidos definido para o teste. A preparação da polpa e ajuste da taxa de alimentação é realizada de maneira similar ao “*Minimag*”. Não existe processo de amostragem, ou seja, toda massa alimentada é destinada para os recipientes de concentrado e rejeito. A duração do teste está condicionada ao nível de polpa no tanque. Quando este estiver muito baixo, o bombeamento começará a perder eficiência. Neste momento, deve-se imediatamente cortar a alimentação do equipamento (fechar o circuito).



Figura 1: Concentrador eletromagnético Micromag.

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

se o campo magnético, ajustando-o para um determinado valor e aguardando 20 minutos para estabilização. Prepara-se a polpa de minério no tanque agitador de 180 L com percentual de sólidos definido para o teste. Em caso de geração de massa, pode-se utilizar um tanque de capacidade maior, operando em linha com o tanque de capacidade menor.

O percentual de sólidos da polpa preparada é checado utilizando balança digital ou balança Marcy. Após preparação e verificação da polpa de alimentação, ajusta-se sua vazão de acordo com a taxa horária (kg/h) definida para o teste calculando-se o tempo gasto para encher um litro de polpa (vide equação abaixo).

$$T = \frac{3600}{\frac{W}{C_w \times D_p}}$$

Onde:

T: tempo gasto para encher um litro

W: taxa horária em kg/h

C<sub>w</sub>: percentual de sólidos em peso

D<sub>p</sub>: densidade de polpa em g/ml

Aciona-se, então, o rotor do equipamento e ajusta-se a pressão da água de lavagem do médio e concentrado conforme valores adotados para o teste. Em seguida, alimenta-se o equipamento, aguardando cinco voltas completas do rotor para estabilização do circuito e faz-se a amostragem dos fluxos de concentrado, médio e rejeito. Finalmente amostra-se o fluxo de alimentação. A figura abaixo apresenta fotos ilustrativas do Minimag.



Figura 2: Concentrador eletromagnético Minimag

**Referências Bibliográficas**

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

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

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

## **ANEXOS**

## ANEXO 1 – DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A difração de raios X é uma das técnicas mais versáteis utilizadas atualmente na identificação mineralógica e obtenção de informações sobre microestruturas cristalinas dos minerais.

Os raios X consistem em radiações eletromagnéticas que se encontram entre 10nm a 0,1nm (ou 1,0 a 100Å) das faixas espectrais, como pode ser observado na figura 3.40.

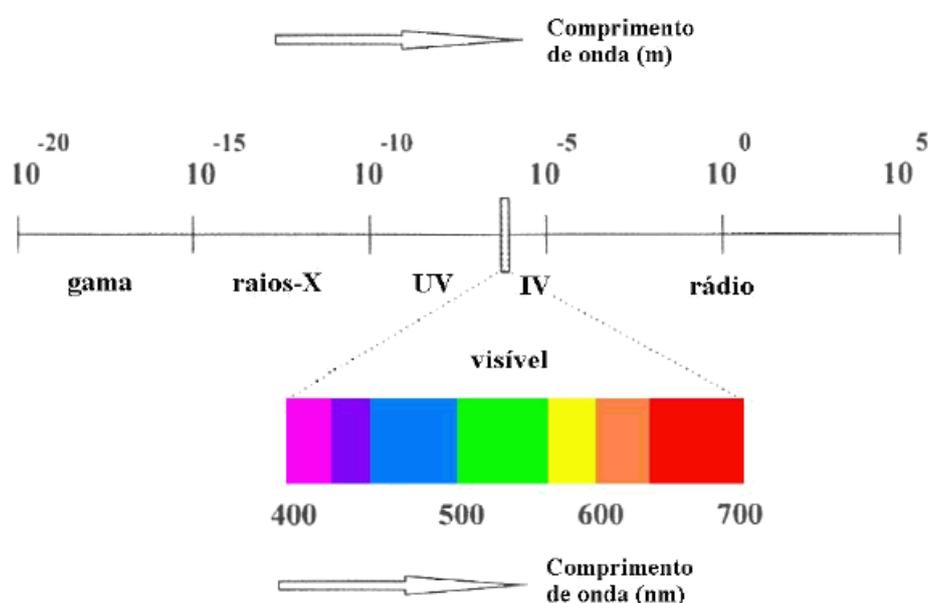


Figura 3.40 – Espectros eletromagnéticos (Brandão, 2013\*).

Os raios X são gerados quando ocorre a desaceleração rápida de uma partícula qualquer carregada eletricamente e com energia cinética suficiente, processo denominado radiação de frenamento. Esta energia pode ser liberada também pelo salto quântico de um elétron para um orbital de menor energia em um átomo excitado ou íon. Estes raios X são conhecidos com características, sendo específicos de cada átomo.

Cristais consistem em sólidos homogêneos com suas estruturas atômicas distribuídas em arranjos ordenados e repetitivos. Apresentam planos paralelos com espaçamento constante e possuem composição química definida. A figura 3.41 apresenta a estrutura cristalina da magnetita.

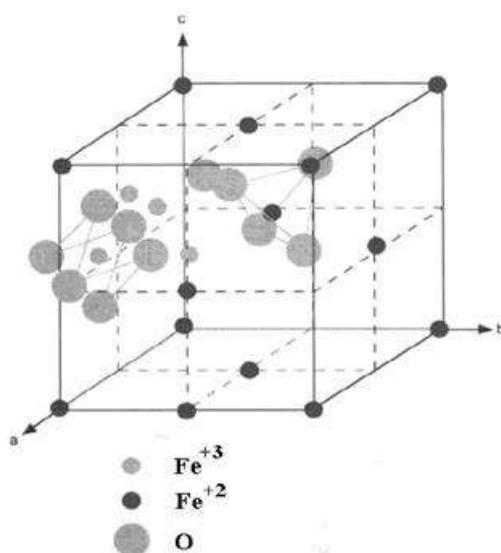


Figura 3.41 – Estrutura cristalina da magnetita (Brandão, 2013\*).

Para ocorrer a difração de raios X é necessária a existência de periodicidade do arranjo atômico ou a presença de rede cristalina, por isso a difratometria de raios X é aplicada apenas em materiais cristalinos. Os raios X são difratados pelos elétrons sem mudança do comprimento de onda e perda de energia. Esta propriedade física possibilita a identificação do mineral e obtenção de informações de sua estrutura. Entretanto, para ocorrer a difração de um feixe de elétrons, as condições geométricas da equação de William H. Bragg e William L. Bragg, a seguir, devem ser atendidas:

$$n\lambda = 2d * \text{sen}\theta \quad (3.6)$$

A difração de raios X é amplamente utilizada na identificação de minerais cristalinos de forma qualitativa, geralmente não aplicada para quantificação das fases minerais devido a fatores tais como tamanho dos cristais e textura poderem afetar a intensidade dos picos (Jenkins e Snyder, 1996). Segundo Neumann et al (2002), outro fator que pode influenciar os picos de intensidade é a orientação preferencial dos cristais gerada na preparação de amostras, que pode ocasionar a superposição de picos de fases minerais diferentes e, conseqüentemente, uma variação na identificação da composição mineralógica.

O método de Rietveld pode ser utilizado para quantificar as fases cristalinas. De maneira simples, o método refina o espectro multifásico total de difração de raios X,

através da minimização da diferença espectral medida e calculada em um difratograma digital (Rietveld, 1969). Segundo Neumann et al (2002), o grande benefício do método de Rietveld, em relação aos outros métodos disponíveis no mercado para quantificação por difração de raios X, é a utilização de todos os pontos de um espectro. Este artifício não permite que superposição de picos afete o método de Rietveld, que é um grande problema para os outros métodos chegando a ocasionar a inviabilização dos mesmos.

### **Referências Bibliográficas**

**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.** Dissertação de Mestrado, UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.