



UFOP
Universidade Federal
de Ouro Preto



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro
Preto
Departamento de Engenharia de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral –
PPGEM



CARACTERIZAÇÃO E TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO PRELIMINAR DE FINOS DE ACIARIA INTEMPERIZADOS

Autor: **Felipe de Paulo**

Orientador: **Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz**

Ouro Preto – MG

2021

Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral

Felipe de Paulo

**CARACTERIZAÇÃO E TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO PRELIMINAR DE FINOS
DE ACIARIA INTEMPERIZADOS**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito do para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Tratamento de Minérios.

Orientador: Prof. José Aurélio Medeiros da Luz.

Ouro Preto – MG

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P331c Paulo, Felipe de.
Caracterização e tratamento físico-químico preliminar de finos de
aciaria intemperizados. [manuscrito] / Felipe de Paulo. - 2021.
103 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz.
Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro
Preto. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mineral.
Área de Concentração: Tratamento de Minérios.

1. Beneficiamento de minério. 2. Lama de aciaria. 3. Siderurgia. 4.
Resíduos industriais. I. Luz, José Aurélio Medeiros da . II. Universidade
Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.751:669.18

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Felipe de Paulo

Caracterização e Tratamento Físico- Químico Preliminar de Finos de Aciaria Intemperizados

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de mestre

Aprovada em 26 de fevereiro de 2021.

Membros da banca

Prof. Dr. - José Aurélio Medeiros da Luz — Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

Dr. Felipe de Orquiza Milhomem — (Consultor independente)

Dr. - Marcus Alexandre Carvalho Winitskowski da Silveira — (Secretaria Municipal de Meio Ambiente da Prefeitura de Belo Horizonte)

José Aurélio Medeiros da Luz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 15/04/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Jose Aurelio Medeiros da Luz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/04/2021, às 13:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0140645** e o código CRC **7A029034**.

Este trabalho é dedicado às pessoas que sempre estiveram ao meu lado pelos caminhos da vida, acompanhando, apoiando e principalmente acreditando no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, pela oportunidade que me foi concedida e por me fortalecer e amparar durante todo este percurso.

Agradeço ao meu orientador Professor Dr. José Aurélio Medeiros da Luz, que dedicou muito do seu tempo me orientando. Obrigado pelos ensinamentos, atenção, amizade e dedicação ao longo deste período que servirão pela vida acadêmica e profissional.

Aos meus pais, Vicente e Angelica que, acreditando em mim, foram sempre parceiros e conselheiros. À minha irmã Melina e ao Caio participarem desta importante etapa da minha vida. À Renata, pelo companheirismo e apoio, tornando essa caminhada a mais leve possível.

Aos amigos do PPGEM: Fabiano, Pedro, Maísa, Rodrigo, Geriane, Paôlla, Geraldo e Tiago por acompanharem e compartilhar os meus anseios diariamente. Aos amigos e técnicos: Mariana Caroline Andrade Silva, Flávio Luiz Martins, Antônio Pedro de Freitas, Luiz Cláudio do Sacramento, por todo o apoio durante a jornada. Agradecimento a empresa Ecosteel Indústria de Beneficiamento Ltda na pessoa do engenheiro Djalma Nere Jr. pelo fornecimento das amostras. À professora Rosa Malena Fernandes Lima pela disponibilidade dos Laboratório de Propriedades Interfaciais e Microscopia Ótica e Difração de Raios X do DEMIN - UFOP. Aos técnicos Dra. Adriana Tropia de Abreu e Antônio Celso Torres (Laboratório de Geoquímica – DEGEO), pela atenção no processo de análise química. Aos professores e membros da banca de qualificação Érica Linhares Reis e Vladimir Kronemberger Alves, pelas contribuições ao trabalho. Aos membros da banca de defesa Felipe de Orquiza Milhomem e Marcus Alexandre Carvalho W. da Silveira pela disponibilidade e observações pertinentes. Ao professor do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Leandro Henrique Santos pelo recorrente apoio. De forma muito especial aos integrantes corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo estudar caracterização tecnológica de uma amostra de lama de aciaria, previamente sujeita a intemperismo. Esse resíduo apresentou a predominância de wustita, magnetita, hematita, franklinita, grafita, calcita e quartzo. A análise química revelou os seguintes teores: 49,33 % de Fe, 9,17 % de Ca, 1,94 % de Mg e 1,06 % de Al. O diâmetro mediano era de 44,02 μm , a massa específica era igual a 2.992,0 kg/m^3 e a área superficial específica, 0,66 m^2/g . O material foi classificado em classificador helicoidal na presença de 1200 g/t de hexametáfosfato de sódio, dispersante mais forte que o metassilicato de sódio, o silicato de sódio e a simples variação de pH, conforme ensaios prévios de turbidez. Estudou-se a concentração densitária, magnética e por flotação em bancada, visando à recuperação dos componentes feríferos. A massa específica real foi empregada como indicador de desempenho. Em uma primeira etapa realizaram-se ensaios prospectórios de concentração densitária com o *underflow* da etapa de classificação, com intuito de promover a recuperação das fases ferrosas, empregando mesa oscilatória Wilfley e jigue tipo Denver, com resultados sofríveis (graus de enriquecimento de 1,07 para a mesa e 1,09 para o jigue) e visível efeito de segregação granulométrica de partículas. Separação magnética de desbaste (*rougher*) em separador do tipo tambor foi testada utilizando planejamento fatorial com as variáveis: tamanho de partículas na alimentação e intensidade do campo magnético. A granulometria da alimentação impacta fortemente a pureza do concentrado, tendo o material oriundo do *underflow* da etapa de classificação o melhor concentrado (massa específica de 4.6200 kg/m^3), com 29,52 % de recuperação mássica. A etapa de separação magnética contemplou uma etapa de esgotamento (*scavenger*) em separador de alta intensidade a úmido, variando-se o tipo de matriz, a intensidade do campo e a granulometria da alimentação. O tipo de matriz foi a variável com maior impacto na qualidade do concentrado final. Os ensaios de flotação foram feitos com o *overflow* da etapa de classificação, usando como coletor o oleato de sódio e como depressores o pirofosfato de sódio e tanino, com somente uma etapa de desbaste (*rougher*). O processo de flotação, em geral, demonstrou uma baixa seletividade. A configuração que demonstrou maior potencial foi a combinação de oleato de sódio com tanino atingindo um teor máximo de 45,62 % de Fe e 37,32 % de recuperação mássica, com a alimentação com um teor de 41,32 % de Fe.

Palavras-chave: Lama de aciaria, resíduo siderúrgico, lamas, beneficiamento de resíduos.

ABSTRACT

The present work aimed to technologically characterize a flue dust steelmaking sample, previously subject to weathering. This residue showed a predominance of wustite, magnetite, hematite, franklinite, graphite, calcite and quartz. The chemical analysis revealed the following contents: 49.33 % Fe, 9.17 % Ca, 1.94 % Mg and 1.06 % Al. The median diameter was 44.0 μm , the true density was equal to 2,992.0 kg/m^3 and the specific surface area, 0.66 m^2/g . The material was classified by helix classifier in the presence of 1200 g/t of sodium hexametaphosphate, a stronger dispersant than sodium metasilicate, sodium silicate and the simple pH variation, according to previous turbidity tests. Bench scale gravity, magnetic and flotation concentration were studied, aiming at the recovery of the ferrous components. The true density was used as a performance indicator. In a first stage, prospective tests of gravity concentration were performed with the classification underflow product, in order to promote the recovery of the ferrous phases, using a Wilfley oscillatory table and a Denver type jig, with poor results (1.07 degrees of enrichment, for the table and 1.09 for the jig) and visible effect of particle size segregation. Magnetic rougher separation using a drum type separator was tested under a factorial design with the following variables: feed particle size and intensity of the magnetic field. Particle size of the feed strongly impacts the purity of the concentrate, with the material from the classifier underflow resulting in the best concentrate (density of 4,6200 kg/m^3), with 29.52 % of mass recovery. The magnetic separation included a scavenger step in a high intensity wet separator, varying the type of matrix, the intensity of the field and the feed particle size distribution. The type of matrix was the variable with the greatest impact on the quality of the final concentrate. The flotation tests were performed with the overflow of the classification step, using sodium oleate as collector and as depressants, sodium pyrophosphate and tannin, with only one rougher step. Flotation has demonstrated low selectivity. The configuration that demonstrated the greatest potential was the combination of sodium oleate with tannin, reaching a maximum content of 45.62 % Fe and 37.32 % of mass recovery, with food with a content of 41.32 % Fe.

Keywords: Arc Electric Furnace Flue dust, steel making waste, steelmaking sludge, waste concentration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema OG de coleta de gases.....	20
Figura 2 - Esquema forno de aciaria a arco elétrico.....	22
Figura 3 - Arranjo Experimental proposto por CANTARINO (2011).	24
Figura 4 - Arranjo experimental proposto por MA (2016)	25
Figura 5 - Potencial Zeta da calcita em diferentes concentrações de oleato de sódio (pH 10) (b) Recuperação na flotação de calcita com diferentes concentrações de oleato de sódio (pH 10)	28
Figura 6 - Influência da dextrina na flotabilidade da calcita com oleato de sódio.	28
Figura 7 - Ângulo de contato do grafita em função do pH.	30
Figura 8 - Recuperação da grafita em função do pH.....	30
Figura 9 - Desempenho do oleato de sódio em sistema limonita/calcita (a) minerais Puros (b) mistura Mineral.	31
Figura 10 - Recuperação dos minerais com adição do pirofosfato de sódio como depressor.	32
Figura 11 - Características de partículas finas e sua influência na flotação.	34
Figura 12 - Efeito do percentual de lamas na flotação.	35
Figura 13 - Flotabilidade versus Tempo de condicionamento. 1. Oxigênio 2. Hidrogênio	38
Figura 14 - Comparativo entre as desempenhos dos diferentes métodos utilizados	38
Figura 15 - Comparação entre recuperação concentrados por separação magnética com flocos e separação convencional.....	42
Figura 16 - Esquema de quarteamento de amostras.	43
Figura 17 - Fluxograma de trabalho.	49
Figura 18 - Esquema mesa oscilatória.	50
Figura 19 - Padrão de difração da amostra	53
Figura 20 - Difratoograma após ataque ácido.	55
Figura 21 - Imagem da partícula plana da lama fina de aciaria com formato plano obtida em MEV.....	57
Figura 22 - Espectro EDS para a análise da primeira estrutura.	58
Figura 23 - Estrutura irregular identificada por MEV.	59
Figura 24 - Espectro de EDS correspondente à partícula da lama fina de aciaria com formato irregular.	59
Figura 25 - Imagem obtida em MEV demonstrando região rica em Fe e O.	60
Figura 26 - Espectro EDS correspondente à partícula esférica da lama fina de aciaria.	60
Figura 27 - Perda ao fogo.	63
Figura 28 - Distribuição granulométrica da fração global.	64
Figura 29 - Turbidez x Dosagem de dispersante.....	68
Figura 30 - Turbidez x pH de polpa.	70
Figura 31 - Resultados dos ensaios gravimétricos.	71
Figura 32 - Análise Granulométrica produtos dos ensaios em jigge.	72
Figura 33 - Produtos da concentração em jigge.....	72
Figura 34 - Diagrama de Pareto dos efeitos estudados sobre as variáveis respostas.	74
Figura 35 - Produtos ensaio 01.	75
Figura 36 - Produtos ensaio 04.	75
Figura 37 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para separador magnético de alta intensidade.	77

Figura 38 - Produtos ensaio 08.	78
Figura 39 - Produtos ensaio 15.	78
Figura 40 - Correlação entre a massa específica x Fe total dos finos de aciaria.	79
Figura 41 - Influência do pH flotação convencional em bancada (Ensaio 08 e 04).	80
Figura 42 - Influência da dosagem do coletor na flotação em bancada (Ensaio 03 e 04).	81
Figura 43 - Influência do percentual de sólidos na flotação em bancada (Ensaio 02 e 04).	81
Figura 44 - Relação recuperação mássica em flotação convencional de bancada na presença pirofosfato de sódio como depressor:.....	83
Figura 45 - Resultados ensaio de flotação em bancada convencional utilizando pirofosfato de sódio como depressor	83
Figura 46 - Resultados ensaio de flotação em bancada convencional utilizando quebracho como depressor.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - NBR 10004/04 – Classificações dos resíduos sólidos	18
Tabela 2 - Alguns tipos de resíduos gerados de plantas de aciaria	19
Tabela 3 - Fases das lamas de aciaria por diferentes pesquisadores.....	23
Tabela 4 - Classificação de tamanho de partículas adotada por Sivamoham & Forsberg de acordo com a granulometria para concentração gravítica.....	39
Tabela 5 - Classificação de susceptibilidade magnética de minerais em temperatura ambiente.....	40
Tabela 6 - Condições de ensaios densitários.....	49
Tabela 7 - Arranjo de ensaios aplicados a flotação convencional em bancada usando ácido oleico como coletor.....	51
Tabela 8 - Arranjo de ensaios aplicados a flotação convencional em bancada usando ácido oleico como coletor e pirofosfato de sódio como depressor.....	51
Tabela 9 - Arranjo de ensaios aplicados a flotação convencional em bancada usando ácido oleico como coletor e tanino como depressor.....	52
Tabela 10 - Identificação de fases.....	56
Tabela 11 - Composição Química	61
Tabela 12 - Análise de regressão para a distribuição de partículas.....	65
Tabela 13 - Área superficial BET.....	65
Tabela 14 - Análise granulométrica underflow do classificador helicoidal.....	66
Tabela 15 - Análise granulométrica overflow do classificador helicoidal.....	67
Tabela 16 - Massa específica por tipo de amostra.....	67
Tabela 17 - Resultados dos ensaios gravimétricos.....	70
Tabela 18 - Resultados obtidos através do separador magnético tipo tambor (rougner).	73
Tabela 19 - Perdas mássicas em formas de lamas.....	76
Tabela 20 - Resultados separação magnética scavenger.....	76
Tabela 21 - Características físico-químicas da alimentação dos ensaios de flotação.	79
Tabela 22 - Resultados ensaios flotação convencional utilizando oleato de sódio como coletor.....	80
Tabela 23 - Resultados de flotação de bancada utilizando depressor pirofosfato de sódio.....	82
Tabela 24 - Resultados de flotação de bancada utilizando depressor quebracho.	85

SUMÁRIO

1-	INTRODUÇÃO E RELEVÂNCIA	12
2-	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral.....	14
2.2	Objetivos específicos.....	14
3-	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Panorama da siderurgia no Brasil.....	15
3.2	Processos de produção de aço.....	15
3.3	Resíduos de aciaria	16
3.3.1	<i>Classificação de resíduos sólidos industriais</i>	16
3.4	Geração de resíduos de aciaria.....	18
3.5	Mecanismo de formação da lama de aciaria	19
3.6	Aplicações da lama fina de aciaria.....	23
3.7	Técnicas para recuperação do ferro presente na lama de aciaria LD 25	
3.8	Flotação	26
3.8.1	<i>Reagentes de flotação</i>	27
3.8.1.1.	Coletores	27
3.8.1.2.	Depressores	30
3.8.1.3.	Espumantes.....	32
3.9	Flotação de finos e ultrafinos de minerais de ferro	33
3.10	Separação densitária	39
3.11	Separação magnética	40
4-	MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1	Amostras para ensaios de caracterização e processo	43
4.2	Análise granulométrica	43
4.3	Massa específica	44
4.4	Análise morfológica	45
4.5	Área superficial	45
4.6	Identificação de fases cristalinas	46
4.7	Análise termogravimétrica	46
4.8	Análises químicas	46
4.8.1.	<i>Análise amostra global</i>	46
4.8.2.	Quantificação do ferro total	47
4.9	Ensaio de dispersão de polpa	48
4.10	Ensaio de concentração exploratórios	48
4.10.1.	<i>Separação densitária</i>	49
4.10.2.	<i>Separação magnética</i>	50
4.10.3.	<i>Testes de flotação em escala de bancada</i>	51
5-	RESULTADOS	53
5.1	Identificação de fases cristalinas	53
5.2	Análise morfológica	56
5.3	Quantificação de elementos químicos	61
5.4	Análise termogravimétrica	63
5.5	Características físicas	64
5.6	Avaliação de dispersantes para polpa	67
5.7	Separação densitária	70
5.8	Ensaio de separação magnética	73
5.9	Ensaio de flotação	79

6- CONCLUSÃO	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
APÊNDICE A – Preparo de solução de reagentes.....	101
APÊNDICE B – Determinação da massa específica por meio de picnometria	103

1- INTRODUÇÃO E RELEVÂNCIA

As atividades humanas, desde o início da civilização até os dias atuais, sempre acarretaram impactos ao meio ambiente. Sobre isso, RODRIGUES (2009), destaca que a ação do homem sobre o meio ambiente é tão antiga quanto a sua própria história. Desde muito tempo vem-se utilizando os recursos naturais como fonte de vida. Depois de tanto tempo de usufruindo dos bens naturais, o homem começou a sofrer as consequências dos seus atos, em muitos casos provenientes de seu uso inadequado.

A questão ambiental no contexto atual tem sido objeto de diversos estudos. Isso em parte se deve à grande preocupação com os impactos negativos das atividades humanas ao meio ambiente. Assim, as mais diversas áreas tentam buscar soluções para diminuir as consequências de suas atividades.

Neste sentido, NYRENDA (1991) e ZEYDABADI *et al.* (1997) destacam que a existência de passivos ambientais nas imediações dos complexos siderúrgicos se torna um problema sério, até porque tais complexos, comumente, acham-se inseridos no entorno de aglomerados urbanos. Especificamente as lamas residuárias de granulação fina possuem baixa recuperação em processos físicos, sendo, portanto, um desafio tecnológico.

Aciarias a oxigênio ou elétricas geram normalmente de 10 a 20 kg de lamas por tonelada de aço produzido (NYRENDA, 1991). Diante do exposto e em conjunto com a produção apresentada pela Secretaria de Geologia e Mineração – SGM (2020), estima-se que o Brasil produziu por volta de 652.000 toneladas deste resíduo no ano de 2020.

As partículas sólidas finas recuperadas durante o despoeiramento a úmido nos conversores Linz–Donawitz — LD são as denominadas lamas de aciaria. A lama fina de aciaria é um resíduo composto predominantemente por óxidos de ferro, ferro metálico e carbonato de cálcio (ANDRADE *et al.*, 2005). O material possui apreciável quantidade de ferro para realização de reciclo em plantas de sinterização (DAS *et al.*, 2006).

Atualmente, diversos estudos abordam técnicas para o reaproveitamento das lamas de aciaria. Os mesmos em sua grande maioria abordam técnicas hidro e pirometalúrgicas (TRUNG *et al.*, 2011; HAY & RANKIN, 1994; CHEN *et al.*, 1992; CANTARINO, 2011).

Dentro deste contexto, o presente estudo busca analisar condições de separabilidade das fases metálicas de lamas finas de aciaria e congêneres. Ensaios de flotação, assim como a separação magnética e técnicas de separação densitária, surgem como alternativa de técnicas físicas de separação para o tratamento desse tipo de resíduo industrial. A caracterização expedita do material foi realizada para conhecer as características dos seus constituintes e prever o comportamento destes frente aos processos estudados. O objetivo geral é alcançar condições preliminares de concentração para os resíduos atualmente dispostos em áreas sem aproveitamento econômico, constituindo-se em grande passivo ambiental para a indústria metalúrgica.

2- OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar as propriedades físicas e químicas dos finos de aciaria e buscar, em nível prospectório, condições de separabilidade das fases ferrosas da lama fina de aciaria através de métodos usuais de concentração para minerais de ferro.

2.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar a lama fina de aciaria conforme suas características químicas, físicas e mineralógicas;
- b) Avaliar a aplicabilidade de processos de separação magnética;
- c) Avaliar a utilização de processos de separação densitária;
- d) Realizar ensaios de flotação em escala de bancada com o intuito de avaliar o conjunto dos reagentes aplicados.

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta a sustentação teórica para o estudo proposto. Diante desta premissa, primeiro procurou-se abordar os temas pertinentes a produção de aço no contexto brasileiro e sua consequente produção de resíduos com destaque para as lamas de aciaria. Posteriormente, foram tratadas as técnicas de processamento mineral compreendidas na pesquisa.

3.1 Panorama da siderurgia no Brasil

O Brasil é atualmente o maior produtor de aço da América Latina representando 53,7 % da produção total da região e está posicionado na 9ª colocação na produção mundial com $32,6 \times 10^6$ de toneladas produzidas no ano de 2019, correspondente a 1,7 % do total. O consumo brasileiro de aço bruto no ano de 2019 atingiu 110,4 kg por habitante. O número de empregados efetivos em atividades de siderurgia somou 106.837 entre funcionários diretos e indiretos no mesmo ano. Ainda é possível ressaltar que o principal destino do aço produzido em terras brasileiras são os Estados Unidos da América. Indica-se um investimento de quase 1 bilhão de dólares investidos no setor no ano de 2019 com faturamento de 24,9 bilhões de dólares. (SGM, 2020)

3.2 Processos de Produção de Aço

O crescimento da produção de aço no cenário após a 2ª Guerra Mundial foi exponencial. O mesmo se tornou um dos pilares para o modo de vida atual da sociedade. Durante a década de 80 houve um processo de estagnação e consequente reestruturação do setor, marcado por inovações tecnológicas em processos e produtos. Na aciaria a carga é oxidada, o que implica em redução do teor de carbono a níveis inferiores a 2 % e de impurezas como fósforo, enxofre e silício até as diferentes especificações exigidas. As unidades siderúrgicas se classificam conforme seu processo produtivo e desenvolveram-se predominantemente em duas rotas tecnológicas, as usinas integradas e as semi-integradas (COSTA, 2002).

As unidades integradas trabalham em três fases básicas, sendo estas, redução, refino e laminação. É um processo utilizado em usinas integradas a carvão (mineral ou

vegetal). Em tais locais trabalha-se com processo a oxigênio pelo Conversor LD (Linz-Donawitz), ou também conhecido pelo termo BOF (*basic oxygen furnace*). Neste caso é utilizado um sopro de oxigênio no ferro-gusa para a oxidação dos componentes em excesso (principalmente carbono). O processo é iniciado com o conversor sendo basculado em direção ao carregamento de gusa sólido e sucata, em seguida adiciona-se gusa líquido. Como a oxidação deste é exotérmica, esta reação é normalmente a única fonte de calor do processo. Este aspecto é condicionante limitador da quantidade de sucata que será adicionada. Colocado na posição vertical, a lança de oxigênio é introduzida até a altura especificada. Após a ignição, faz-se a adição de fundentes por meio de silos para o interior do conversor. O sopro de alta pureza tem aproximadamente 18 minutos de duração (ARAÚJO, 2007; COSTA, 2002).

Com relação às aciarias elétricas, que também podem ser chamadas de usinas semi-integradas, operam em duas fases, refino e laminação. Em geral, as plantas se diferem bastante no que toca às configurações e tamanho de forno, práticas operacionais, produtos e insumos (COSTA, 2002). Neste contexto, o refino é feito através da utilização de forno elétrico a arco onde o calor necessário à fusão da carga é produzido pela ação de um arco elétrico formado entre eletrodos (CONAMA, 2006). Após a fusão a carga metálica passa pelas etapas de refino oxidante (o oxigênio introduzido oxida os elementos químicos de interesse, eliminando-os em forma de óxidos) e refino secundário que tem por objetivo reduzir o metal, eliminar o enxofre e realizar o acerto da composição química (ARAÚJO, 2007).

3.3 Resíduos de aciaria

3.3.1 Classificação de resíduos sólidos Industriais

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT define os tipos de resíduos baseados nas seguintes normas:

- a) NBR 10004/04 – Resíduos sólidos – Classificação;
- b) NBR 10005/04 – Lixiviação de resíduos – Procedimentos;
- c) NBR 10006/04 – Solubilização de Resíduos Procedimento;
- d) NBR 10007/04 – Amostragem de resíduos – Procedimento;

- e) NBR 11174/90 – Armazenamento de resíduos classes II – não inertes e III – inertes – Procedimento;
- f) NBR 13221/21 – Transporte de resíduos – Procedimento;
- g) NBR 13463/95 – Coleta de resíduos sólidos Classificação; e
- h) NBR 14644-1/19 – Salas limpas e ambientes controlados associados.
Parte 1: Classificação da limpeza do ar por concentração de partículas.

A classificação de resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido (ABNT, 2004).

A caracterização desses resíduos é trabalhosa e possui várias etapas, a operação tem como principal objetivo determinar as características físico-químicas do material em questão, estabelecendo-se as características do mesmo como matéria-prima para diferentes indústrias (SILVA, 2006).

A NBR 10004/04 classifica os resíduos sólidos em três classes com relação aos potenciais riscos ao meio ambiente e à saúde pública, para que os mesmos possam ter manuseio e destinação adequados, sendo elas (Tabela 1):

Tabela 1 - NBR 10004/04 – Classificações dos resíduos sólidos

Classificação	Situação	Descrição
Classe I	Perigosos	Apresentam periculosidade real ou potencial à saúde humana ou aos organismos vivos e que se caracterizam pela letalidade, não degradabilidade e pelos efeitos cumulativos diversos, ou ainda por uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
Classe II (A)	Não Perigosos - Não inertes	Trata-se dos resíduos que não são compatíveis com as características das classificações Classe I – Perigosos ou Classe II (B) – Inertes. Em suas propriedades estão incluídas a combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
Classe II (B)	Não perigosos – Inertes	São os resíduos que, quando amostrados e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões da água potável, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

Fonte: NBR 10004/04.

3.4 Geração de resíduos de aciaria

Durante a produção de uma tonelada de aço produz-se em conjunto de 2 a 4 toneladas de resíduos. Em diversos processos de produção de ferro e aço, são gerados por volta de 500 kg de resíduos sólidos de diferente natureza. A composição destes materiais varia conforme sua origem, mas usualmente possuem conteúdo de potencial reutilização como ferro, carbono, cálcio, zinco, chumbo e outros. Além disso, algumas escórias e lamas possuem materiais bastante danosos ao meio ambiente como metais pesados. A Tabela 2 informa os resíduos sólidos e líquidos gerados em uma planta de siderurgia (DAS *et al.*, 2006; BAGATINI *et al.*, 2011).

Tabela 2 - Alguns tipos de resíduos gerados de plantas de aciaria

Resíduos Sólidos/Líquidos	Metal produzido (kg/t)	Fonte de geração
Escória de alto forno	340-421	Alto forno
Poeira/lama de alto forno	28	Alto forno
Escória da planta de sinterização	-	Planta de sinterização
Escória LD	200	Conversor LD
Lamas LD	15-16	Conversor LD
Escórias	-	Planta de tratamento de água

Fonte: Adaptado de DAS *et al.* (2006).

Dentre os resíduos sólidos expostos na Tabela 2 os que possuem maior potencial para a reaproveitamento podem se destacar a lamas e escórias de alto forno e lamas LD. A recuperação dos valores metálicos contidos nos mencionados resíduos passa a ser essencial tanto para o ponto de vista econômico por contribuírem com a redução dos custos da operação quanto do ponto de vista ambiental atendendo especificações impostas pela legislação vigente (TAKANO *et al.*, 2000).

SOUZA (2006) expõe que a preocupação em se recuperar e reciclar os resíduos gerados pela indústria siderúrgica tem ocupado um papel de destaque no panorama industrial. O número de pesquisas que vêm sendo desenvolvidas abre margem a essa premissa.

3.5 Mecanismo de formação da lama de aciaria

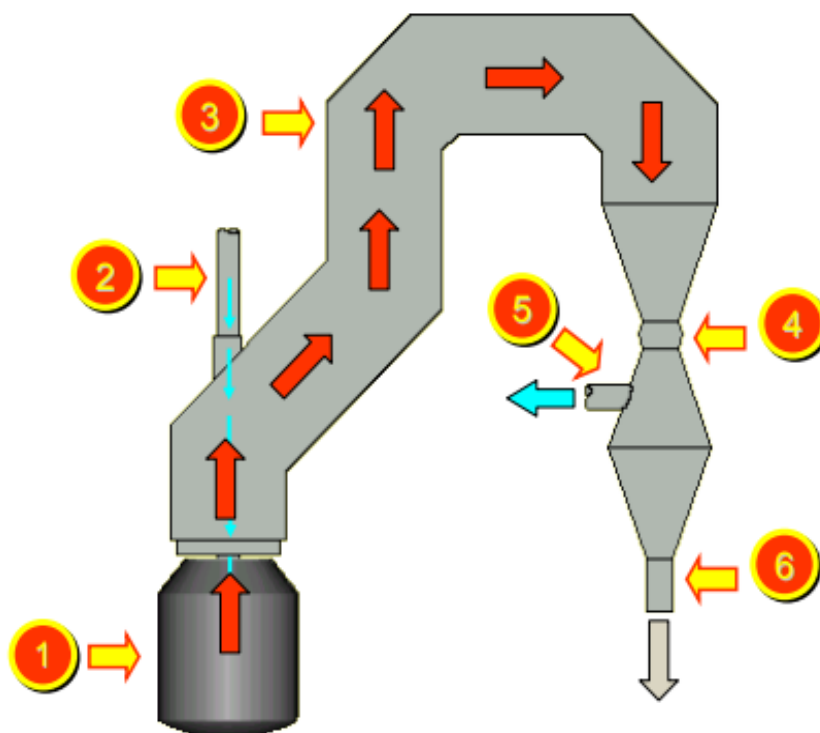
De acordo com a NBR 10004, a lama de aciaria é classificada como resíduo sólido perigoso, Classe I, exigindo assim estocagem em locais adequados, ou seja, cobertos e protegidos das intempéries (SILVA, 2006). Em consequência, a existência de um sistema de coleta e limpeza de gases se faz necessária para designação adequada do resíduo.

Conforme SOUZA (2006), as lamas finas e grossas de aciaria são oriundas da mesma etapa no conversor LD, durante o processo de sopro de oxigênio para o refino do aço.

ARAÚJO (2007) expõe que a geração dessas lamas é atribuída à maneira com que os gases de combustão são limpos durante o processo.

No primeiro momento o sopro é responsável pela oxidação do silício em sílica que por sua vez é responsável pelo início do aquecimento do forno e fornecer sílica suficiente para a formação da escória de equilíbrio. Na segunda etapa ocorre a oxidação do carbono gerando o gás (CO/CO_2), que é responsável pela continuidade do aquecimento e é a demanda a ser atendida pelo processo. Partículas de ferro menores que $38\ \mu\text{m}$ são oxidadas e arrastadas juntamente com a mescla de CO e CO_2 para o sistema de coleta de gases denominado sistema OG. Durante a lavagem dos gases pelos venturis que compõem o sistema OG, forma-se a lama de aciaria. A Figura 1 esquematiza o processo abordado (ARAÚJO, 2007; SOUZA, 2006).

Figura 1 - Sistema OG de coleta de gases.



Fonte: Adaptado de SOUZA (2006).

Na Figura 1, em (1) observa-se o Conversor LD, as setas azuis representam a entrada do sopro de oxigênio, sendo (2) a lança responsável por insuflar o mesmo. O gás é

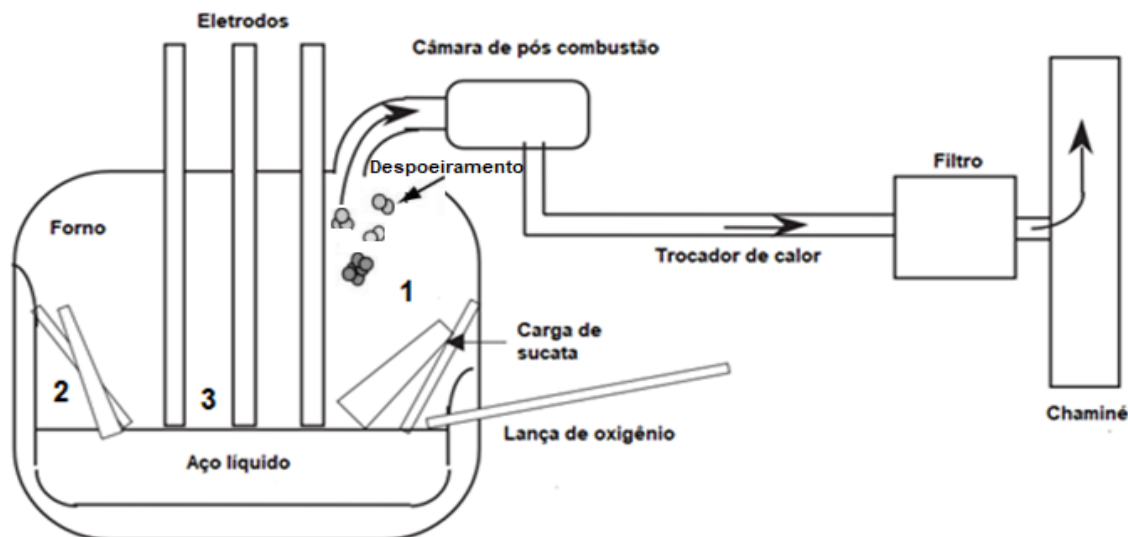
direcionado pelo Sistema OG (3) até o canal Venturi (4) onde ocorre a limpeza do gás CO/CO₂. O gás é coletado (5) para estocagem/queima e a desgarga da lama residual é realizada (6).

As partículas sólidas finas recuperadas durante o despoeiramento a úmido nos conversores LD são as denominadas lamas de aciaria (DAS *et al.*, 2006). Conforme o processo de limpeza abordado gera-se duas frações diferentes de lama, sendo denominadas lama grossa partículas maiores que 45 µm e partículas menores que 45 µm e a separação entre elas geralmente se dá pela utilização de classificador do tipo helicoidal. A sua produção pode variar conforme cada processo e possui ordem de 36 kg.t⁻¹ de aço produzido. (SOUZA, 2006; VIEIRA *et al.*, 2006). CANTARINO (2011) informa que uma unidade de aciaria elétrica pode produzir cerca de 5,6 a 7,2 kg.t⁻¹ de lama grossa e de 17 a 22,8 kg.t⁻¹ de lama fina.

Com relação à aciaria elétrica, o pó é gerado de maneira análoga (no sistema de coleta e limpeza de gases) mas em sua vez no forno elétrico a arco. O mecanismo de desempoeiramento se dá por meio de filtros que retêm os particulados emitidos no processo de refino (LOBATO, 2014).

A Figura 2 traz um esquema simplificado sobre o funcionamento do forno elétrico a arco. Em (1) é representado o momento imediatamente após o carregamento, a faixa de temperatura é 300 a 600 °C, em (2) a temperatura se encontra na faixa de 500 a 900 °C sendo uma etapa intermediária da fusão do aço. Em (3) a fusão já se encontra no estágio final, a temperatura varia de 1100 a 1500 °C. Os principais mecanismos de formação das poeiras são a volatilização e a ruptura de bolhas de monóxido de carbono durante o processo de refino e as mesmas são removidas através da abertura indicada. Detalhadamente, os fatores de formação podem ser descritos como a vaporização no contato do eletrodo com o banho e na região do sopro de oxigênio, ejeção de gotas na região de formação do arco elétrico e do sopro de oxigênio, ejeção de gotas pelo borbulhamento de monóxido de carbono, contato das bolhas com a atmosfera oxidante e pelo arraste ocasionado pela adição de carga no banho (ARION *et al.*, 2001; GUEZENNEC *et al.*, 2004; APOCALYPSE, 2016).

Figura 2 - Esquema forno de aciaria a arco elétrico.



Fonte: Adaptado de ARION *et al.* (2001).

A lama de aciaria possui algumas variações em sua composição e caracterização, principalmente relacionadas à diferença de granulometria entre a fina e a grossa e o processo de produção empregado. Com relação à lama fina de aciaria de conversores LD, são abordadas algumas composições encontradas na literatura.

Segundo VIEIRA *et al.* (2007), a lama fina de aciaria é composta principalmente por óxidos de ferro e calcita, que é introduzida nas panelas de conversão de ferro gusa em aço. Uma pequena fração de MgO pode estar ligada ao agente dessulfurante utilizado no processo e a fração com SiO₂ pode ser oriunda da oxidação de silício ou da escória, e o ZnO pode estar associado à utilização de sucata galvanizada.

CANTARINO (2011) encontrou em seu estudo principalmente óxidos de ferro, zinco e cálcio, além de grafita. MENDES (2009) caracterizou uma amostra composta por ferro elementar, magnetita, hematita, wustita, calcita e quartzo. Confirmou-se a predominância de ferro na lama de aciaria, tanto na forma metálica quanto na forma de óxidos.

A Tabela 3, adaptada de PAIS (2010) é um compilado das fases minerais identificadas em diversos estudos englobando as lamas de aciaria geradas em conversores LD e forno elétrico a arco.

Tabela 3 - Fases das lamas de aciaria por diferentes pesquisadores.

Autores	Origem	Fases																
		Ferro Metálico	Wustita	Hematita	Magnetita	Quartzo	Zincita	Franklinita	Calcita	Halita	Silvita	Cal	Grafita	Cromita	Periclase	Ausmanita	Ferrita de zinco	Fluorita
BRUCKARD <i>et al.</i> (2005)	FAE ¹				X	X	X	X	X	X	X	X						
CRUELLS <i>et al.</i> (1992)	FAE			X	X	X	X		X				X					
MACHADO <i>et al.</i> (2006)	FAE				X	X	X	X						X	X	X		
LAFORREST & DUCHESNE (2006)	FAE			X	X													
KELEBEK <i>et al.</i> (2004)	LD ²		X	X													X	
VIEIRA <i>et al.</i> (2006)	LD	X	X		X				X									
MAJUSTE & MANSUR (2008)	LD			X	X				X					X				

¹Aciaria que emprega forno a arco elétrico.

²Aciaria que emprega conversores LD.

Fonte: Adaptado de PAIS (2010)

3.6 Aplicações da lama fina de aciaria

A maior parte dos resíduos sólidos na indústria do aço são utilizados na produção de cimento, no setor de pavimentação, na produção de cerâmicas dentre outros (SARKAR & MAZUMBER, 2015). A lama fina de aciaria possui apreciáveis teores de ferro em sua composição, portanto, grande parte das técnicas dedicadas a reutilização do material visa o aproveitamento desse constituinte. A fração de ferro chega a ordem de 60 % na lama fina. O alto conteúdo de zinco é uma das maiores barreiras para o reaproveitamento do mesmo de maneira bruta na produção do ferro gusa. No alto-forno, o ZnO causa redução da permeabilidade da carga, desgaste excessivo do material refratário da parede da cuba, diminuição da temperatura do gusa e aumento no consumo de coque (CANTARINO, 2011; DAS *et al.*, 2006; ANDRADE *et al.*, 2005; NOLASCO-SOBRINHO *et al.*, 2003; MA, 2016).

ARCELORMITTAL (2009 apud CANTARINO, 2011) discorre sobre as aplicações da lama fina e grossa em aciaria LD após briquetagem como substituto ao minério de

ferro utilizado como refrigerante no processo de fabricação do aço. Ainda é relatada a utilização na sinterização sob a forma de “pelotas” visando substituir o *sinter feed* na carga metálica.

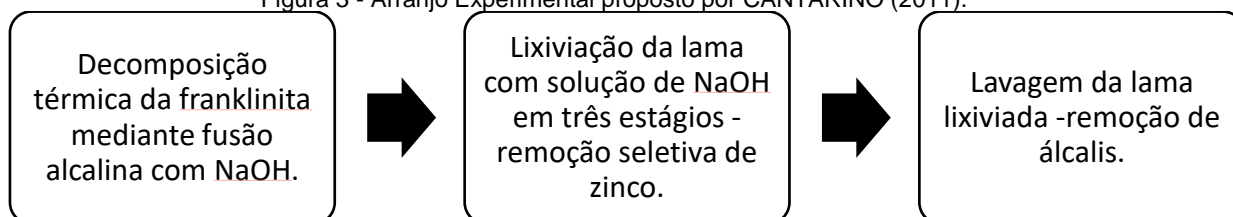
SARMA *et al.* (1996) executou com sucesso em escala piloto o reaproveitamento de lamas como matéria bruta rica em zinco para a indústria não ferrosa, na produção de cimento e no setor de pavimentação.

VIEIRA *et al.* (2007) demonstrou a viabilidade de realizar uma blendagem com 20 % (em peso) de lama fina de aciaria em microestrutura de argila caulínica na fabricação de tijolos e telhas, embora tenha sido detectada uma queda de resistência em relação à cerâmica usual.

Muito embora a aplicabilidade da lama de aciaria seja ampla, PEREIRA (1982 apud CANTARINO, 2011) e SAUERT *et al.*, (1999) ressaltam que elementos presentes na lama grossa e fina de aciaria como zinco e álcalis podem prejudicar a operação de sinterização e alto-forno caso não seja realizada uma adequação de especificações de composição química do sinter. DAS *et al.* (2006) discorrem que para a utilização aperfeiçoada da lama de aciaria na sinterização se faz necessária a pelletização do material.

CANTARINO (2011) aplicou com sucesso uma rota híbrida consistindo em etapas de fusão-lixiviação-precipitação gerando dois produtos para reaproveitamento (Figura 3), um rico em ferro e com grande parte do zinco/álcalis removidos para aplicação na sinterização e outro rico em zinco para outras aplicações. O teor inicial de zinco da lama foi reduzido de 4,37 % para 0,40 %. A razão Fe/Zn na fase original era de 11,6 e passou para 128,8 para lama tratada.

Figura 3 - Arranjo Experimental proposto por CANTARINO (2011).



Fonte: Cantarino (2011).

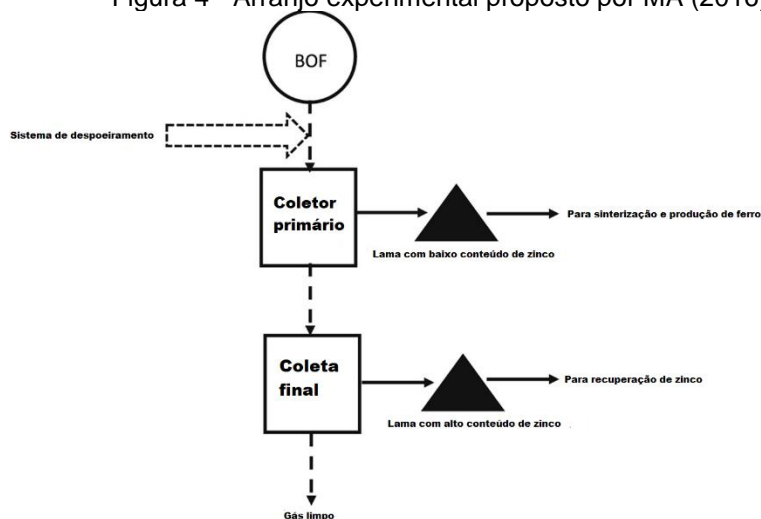
3.7 Técnicas para recuperação do ferro presente na lama de aciaria LD

BRUCKARD *et al.* (2006) analisaram o emprego das operações de separação magnética via úmida operando na faixa de 0,6 e 1,6 A, ciclone e lavagem e encontraram uma porção rica em ferro com potencial para passar pelo processo de briquetagem ou pelletização com um redutor para a reciclagem, com o intuito de recuperar a fração de ferro presente.

TRUNG *et al.* (2011) empregou uma rota de processo hidrometalúrgica para a separação do ferro e zinco presentes na lama de aciaria. Foram examinadas soluções de ácido sulfúrico em pressão atmosférica e temperaturas acima dos 100 °C em escala de laboratório com o intuito de determinar as condições ótimas. Os resultados experimentais demonstraram que a quantidade de zinco lixiviado foi a maior (70 %) quando utilizado a concentração de 1 M de ácido sulfúrico com o tempo de lixiviação até 15 minutos e a temperatura de 80 °C. Os resultados foram promissores, mas possuíram baixa seletividade entre Fe/Zn.

A abordagem realizada por MA (2016) propôs a separação do zinco durante a coleta dos resíduos sólidos (Figura 4). Em escala industrial mediu-se a distribuição do zinco no sistema de limpeza de gases e observaram-se os pontos em que o metal em questão é desprezível para a realização da coleta, a viabilidade então fica atraída a confecção de um novo projeto para o sistema de coleta de gases.

Figura 4 - Arranjo experimental proposto por MA (2016)



Fonte: MA (2016).

GARGUL & BORYCZKO (2014) confirmaram a viabilidade da lixiviação do zinco através da aplicação de soluções de amônia em lamas com o conteúdo de zinco de 2,82 %. Foram aplicadas soluções de três sais de amônia NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ e o NH_4OH , tendo o cloreto de amônio melhor desempenho dentre eles reduzindo o conteúdo do elemento para 0,95 %.

Processos pirometalúrgicos como fusão com pré-redução, estágio simples de fusão dentre outros arranjos foram aplicados por HAY & RANKIN (1994) com o intuito de se obter a recuperação do zinco e ferro presentes. Concluiu-se que vários processos são viáveis e que a escolha pela melhor metodologia seria inerente a cada local.

Na literatura revisada observa-se que a maior parte dos objetos de pesquisa estão relacionados à técnicas hidrometalúrgicas, pirometalúrgicas e híbridas. Conforme exposto por CANTARINO (2011), tais processos demandam um enorme investimento, no caso de processos pirometalúrgicos, exigem um grande e eficiente sistema de abatimento de poluição atmosférica. O mesmo ainda afirma que os processos hidrometalúrgicos podem apresentar dificuldade na lixiviação de espécies como a ferrita. Com relação aos métodos físicos, existe uma dependência à distribuição granulométrica do material, bem como sua composição química e grau de liberação.

3.8 Flotação

A flotação é uma técnica que explora a energia de cargas superficiais para realizar a separação de minerais. Em temperatura constante, qualquer diferença nesses parâmetros presentes nos minerais pode ser utilizada para separação em contato com duas fases fluidas, no caso, líquido e gás. As diferenças de tensões superficiais levam o mineral a atingir um estado de hidrofóbico ou hidrofílico. Essa diferença permite as espécies hidrofóbicas serem coletadas pela fase gasosa e as hidrofílicas permanecerem na fase líquida (RAO, 2004).

A flotação é uma técnica muito versátil para a separação físico-químico de partículas, apresentando atualmente diversas aplicações, minerais e não minerais. A mesma pode ser adaptada para uma enorme gama de separações minerais já que com o auxílio de pré-tratamentos químicos existe a possibilidade de se alterarem as

características de superfície dos minerais, assim impondo aos mesmos hidrofobicidade necessária para a separação ocorrer seletivamente (KAWATRA, 2011; WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

BALTAR (2010) expõe que as técnicas geralmente utilizadas em separações físicas demandam sensível uniformidade na distribuição de tamanhos e uma marcante propriedade diferenciadora. No caso da flotação, ao diminuir o tamanho das partículas, a influência das propriedades de superfície cresce progressivamente. Com isso, diferenças físicas passam a possuir menor importância, impondo à técnica maior tolerância à presença de partículas finas e distribuição granulométrica diversificada.

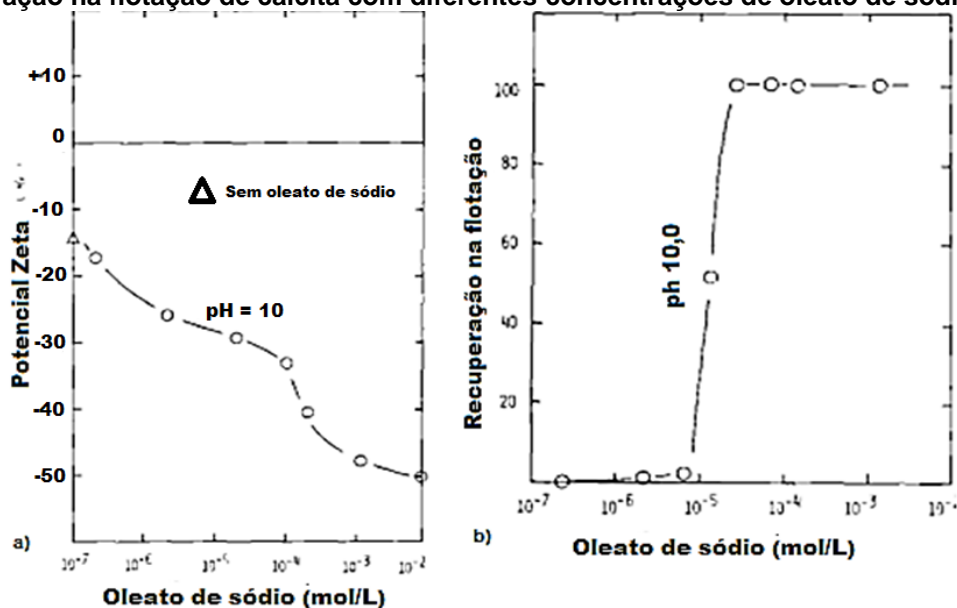
3.8.1 Reagentes de flotação

3.8.1.1. Coletores

Os coletores são surfactantes, ou seja, possuem uma parte molecular não iônica e outra polar iônica. O grupo polar dos coletores é responsável por se adsorver na superfície do mineral, enquanto a cadeia de hidrocarbonetos é a responsável pelo caráter hidrofóbico após adsorção. A carga na porção polar do coletor geralmente é o que o classifica como aniônico, não-iônico e catiônico (REIS, 2004). Neste tópico serão abordados os coletores oleato de sódio e querosene.

Vários estudos apresentam a alta flotabilidade da calcita utilizando oleato de sódio (PUGH & STENIUS, 1985; RAO *et al*, 1989; LI *et al.*, 2017). MISHRA (1982) estudou o comportamento da calcita na presença de oleato de sódio utilizando o tubo de Hallimond modificado, e também o efeito desse coletor no potencial eletrocinético e na recuperação. Verificou-se que o valor negativo do potencial eletrocinético aumentou à medida que se adicionava oleato de sódio, o que pode indicar uma adsorção específica dos íons de oleato na superfície negativa do mineral (Figura 5 (a)). É possível também verificar que em concentrações de oleato de sódio próximas de 10^{-5} mol.L⁻¹, a calcita atinge os valores máximos de recuperação (Figura 5(b)).

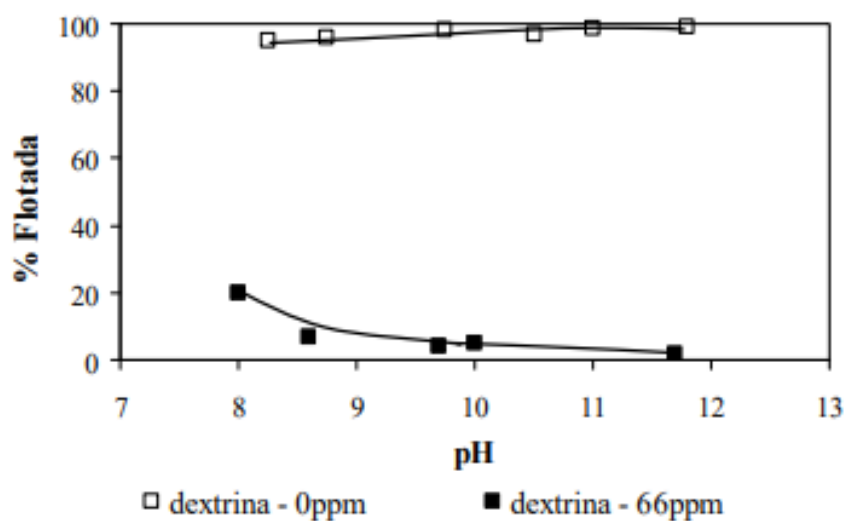
Figura 5 - Potencial Zeta da calcita em diferentes concentrações de oleato de sódio (pH 10) (b) Recuperação na flotação de calcita com diferentes concentrações de oleato de sódio (pH 10)



Fonte: Adaptado de MISHRA (1982).

LIU *et al.* (1994) também avaliaram o sistema oleato de sódio/calcita. A Figura 6 mostra resultados de flotabilidade de calcita em microflotação utilizando oleato de sódio ($1,19 \times 10^{-4}$ M) como coletor e na ausência de depressor e com 66 ppm de dextrina variando o pH, sendo possível verificar a alta recuperação da calcita em toda a faixa testada.

Figura 6 - Influência da dextrina na flotabilidade da calcita com oleato de sódio.



Fonte: LIU *et al.* (1994)

LOPES & LIMA (2009) estudaram a viabilidade técnica de concentração de um minério com 35,34 % de Fe, usando flotação direta em escala de bancada com oleato

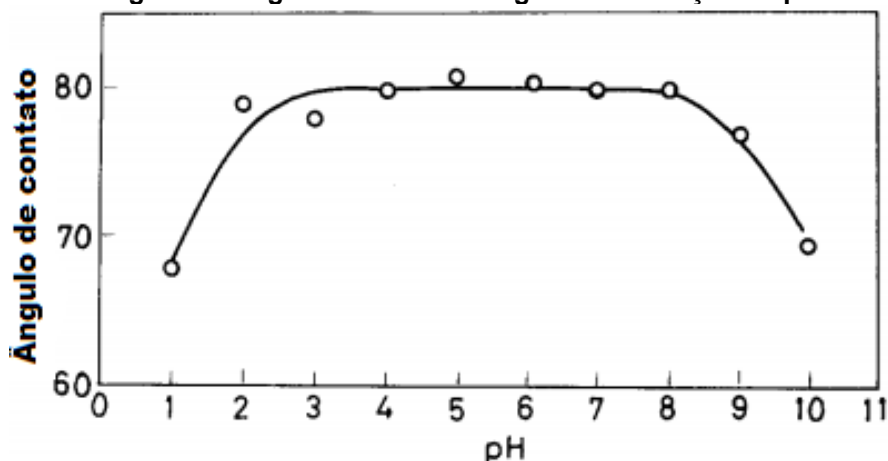
de sódio como coletor dos óxidos de ferro e silicato de sódio como depressor da ganga silicatada. Delimitando a porcentagem de sólidos da polpa em 60 %, a dosagem de depressor em 600 g/t e a dosagem de oleato de sódio em 1200 g.t⁻¹ foi obtido um concentrado com 58,1 % de Fe, 14,4 % de SiO₂ e recuperação metalúrgica de 88 %.

Já COSTA (2009) realizou ensaios de microflotação em célula de Fuerstenau para recuperação de hematita utilizando oleato de sódio obtendo recuperações da ordem de 80 % com uma dosagem de 300 g/t em pH 6 e 7 na ausência de depressores.

De acordo com SAMPAIO *et al.* (2008), o querosene é comumente utilizado como coletor da grafita e o óleo de pinho é utilizado como espumante. A recuperação global do processo de beneficiamento é, usualmente, por volta de 80 %.

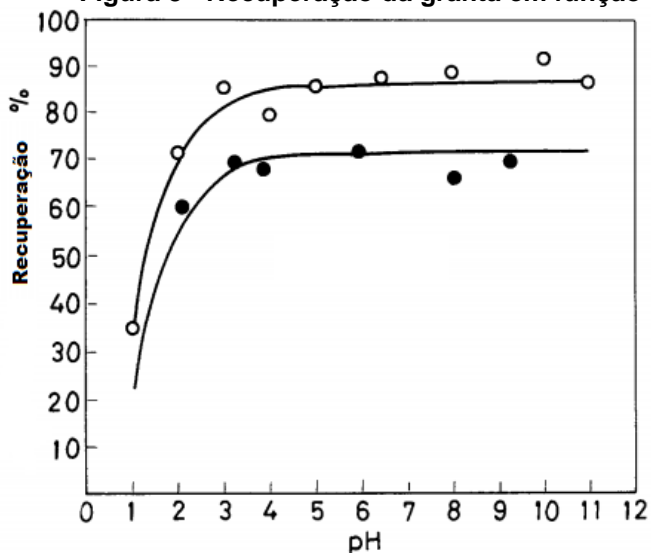
WAKAMATSU & NUMATA (1991), desenvolveram um estudo acerca da flotação de grafita. A Figura 7 mostra a variação do ângulo de contato da grafita de acordo com o pH. É possível verificar que entre o pH 2 e 7 o ângulo de contato varia entre 77 ° e 81 °, indicando elevada hidrofobicidade. A recuperação na flotação de acordo com diferentes valores de pH testados, utilizando tubo de Hallimond modificado, é apresentada na Figura 7. Ao contrário do que se esperaria, não houve declínio da flotabilidade em pH maior que 8, no qual o ângulo de contato decresce, como acontece com outros minerais naturalmente hidrofóbicos. Os autores dizem ainda que, para a flotação de grafita, uma variedade de óleos apolares como o querosene é usado, e geralmente combinado com espumantes como óleo de pinho. O pH é normalmente ajustado para 8 e o silicato de sódio é adicionado como depressor da ganga (Figura 8).

Figura 7 - Ângulo de contato do grafita em função do pH.



Fonte: Adaptado de WAKAMATSU & NUMATA (1991)

Figura 8 - Recuperação da grafita em função do pH.



Recuperação na flotação de grafita em função do pH.

○ Alimentação: Moagem a seco; Tempo de flotação 70s; Tamanho de partícula: 295-208 μm
 ● Alimentação: Moagem a úmido; Tempo de flotação 120s; Tamanho de partícula: 208-147 μm

Fonte: Adaptado de WAKAMATSU & NUMATA (1991)

3.8.1.2. Depressores

A finalidade do uso de reagentes depressores na flotação é aumentar a seletividade do sistema, impossibilitando dessa forma que o coletor adsorva na superfície de minerais que não se deseja flotar. Os depressores, nesse caso, adsorvem-se seletivamente nos minerais que não devem ser coletados (RABELO, 1994).

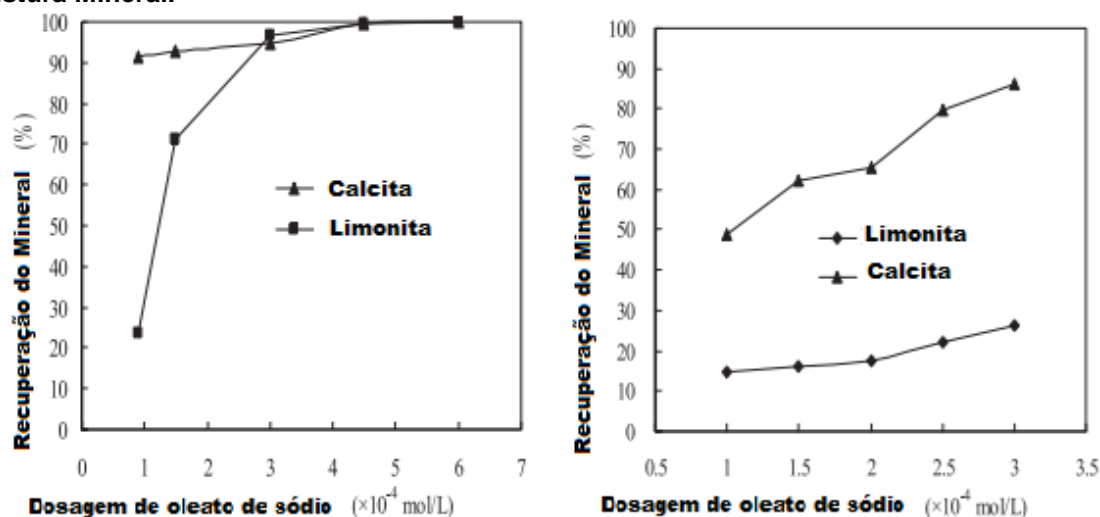
De acordo com LASKOWSKI *et al.* (2007), os depressores mais utilizados são os polissacarídeos, que por sua vez agem como ácido formando interações ácido-base.

Segundo LIU *et al.* (1994), a acidez ou basicidade dos óxidos está ligada ao ponto isoelétrico do mesmo, quando este é elevado considera-se a superfície básica e quando é baixo considera-se ácida.

SILVA *et al.* (2012), demonstraram que na superfície da calcita em pH 5 a 8 o silicato de sódio, indiferentemente a sua concentração, possui forte efeito depressor na presença do oleato de sódio (150 g/t), com reduções de até 97% em sua flotabilidade. Com relação ao sistema composto de apatita e calcita, RAO *et al.* (1989) expuseram que o silicato de sódio teve atuação como depressor da calcita em pH 8 e 9. Esse efeito foi observado com concentração mínima de $1,3 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$.

Em um estudo de microflotação com calcita e limonita, WANG *et al.* (2018) demonstraram que mesmo calcita e limonita apresentando bons resultados na flotação com oleato de sódio em pH entre 7,5 e 10,0 (Figura 9), foi possível deprimir a limonita utilizando pirofosfato como depressor, atingindo teor de 50,5% Fe e recuperação de 91,5% de Fe.

Figura 9 - Desempenho do oleato de sódio em sistema limonita/calcita (a) minerais Puros (b) mistura Mineral.

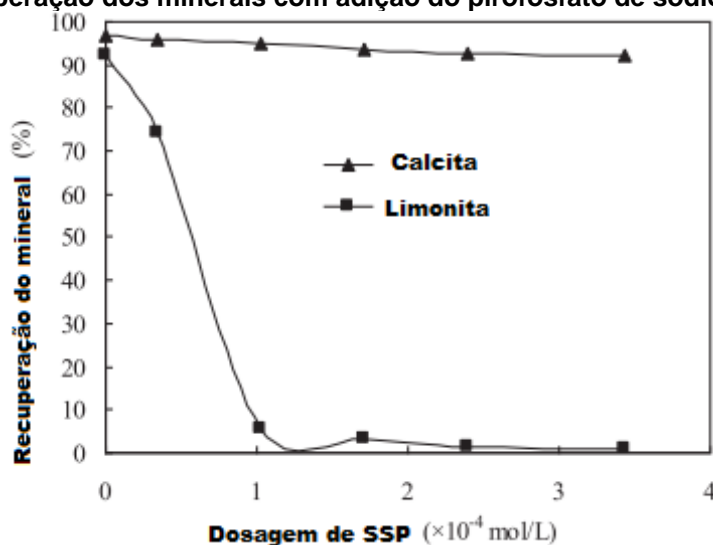


Fonte: Adaptado de WANG *et al.* (2018).

Neste sentido, WANG *et al.* (2018) notaram que a limonita era deprimida na presença do mineral calcita e concluíram que a dissolução da calcita, ao liberar Ca^{2+} , estaria influenciando na depressão da limonita, onde os cátions estariam formando um precipitado de oleato de cálcio, reduzindo o oleato de sódio adsorvido na superfície da limonita. Diante do exposto, optou-se por adicionar o pirofosfato de sódio no

sistema com o intuito de potencializar a depressão da limonita e garantir a separabilidade. A Figura 10 mostra o efeito na recuperação em um sistema com oleato de sódio como coletor (3×10^{-4} mol/L) e pirofosfato em diferentes dosagens, com pH igual a 9,5.

Figura 10 - Recuperação dos minerais com adição do pirofosfato de sódio como depressor.



Fonte: Adaptado de WANG *et al.* (2018).

3.8.1.3. Espumantes

A função dos espumantes é principalmente diminuir a tensão superficial na interface gás-líquido, diminuindo o tamanho das bolhas e formando um filme líquido ao redor da bolha, o que auxilia no aumento da estabilidade e dispersão das bolhas de gás (BULATOVIC, 2007). Sua estrutura se assemelha ao dos coletores, a diferença é que pelo caráter funcional do grupo polar o espumante atua na interface gás-líquido e o coletor na interface gás-sólido. Segundo CHAVES *et al.* (2010) no caso dos coletores, estes possuem o radical polar ativo, iônico quimicamente o que permite que ele interaja química ou eletricamente com a superfície do mineral, enquanto os espumantes por excelência têm um radical liofílico, não ionizável que apresenta afinidade pela água. Sendo assim, os espumantes em solução aquosa, adsorvem-se na interface gás-líquido de forma que a parte polar interage com o dipolo da molécula de água e a cadeia hidrocarbônica, por sua vez, orienta-se no sentido da fase gasosa.

O óleo de pinho tem ampla utilização no processo de flotação, tem bons resultados com a maior parte dos coletores e baixo custo. É um produto natural, com predominância de terpineóis ($C_{10}H_{17}OH$), alfa, beta e gama, mas muitos de seus compostos ainda não foram totalmente identificados. Seu consumo médio é de aproximadamente 50 g/t (CHAVES *et al.*, 2010).

Alguns espumantes podem ainda ter efeito coletor. No que tange a este assunto, BALTAR & RAMOS (1985) afirmam que o espumante pode influenciar na hidrofobicidade de um mineral atuando como coletor, favorecendo a adsorção do coletor à superfície mineral e interagindo com o coletor ao estabilizar o agregado bolha-partícula. Sendo assim, esses autores desenvolveram um estudo de microflotação, tendo verificado que o óleo de pinho apresentou maior efeito coletor para o quartzo e a calcita, quando comparado com metilisobutilcarbinol e ácido cresílico. O maior resultado de flotabilidade para a calcita foi 5,2 % utilizando 33 ppm de óleo de pinho em pH 4,0.

3.9 Flotação de finos e ultrafinos de minerais de ferro

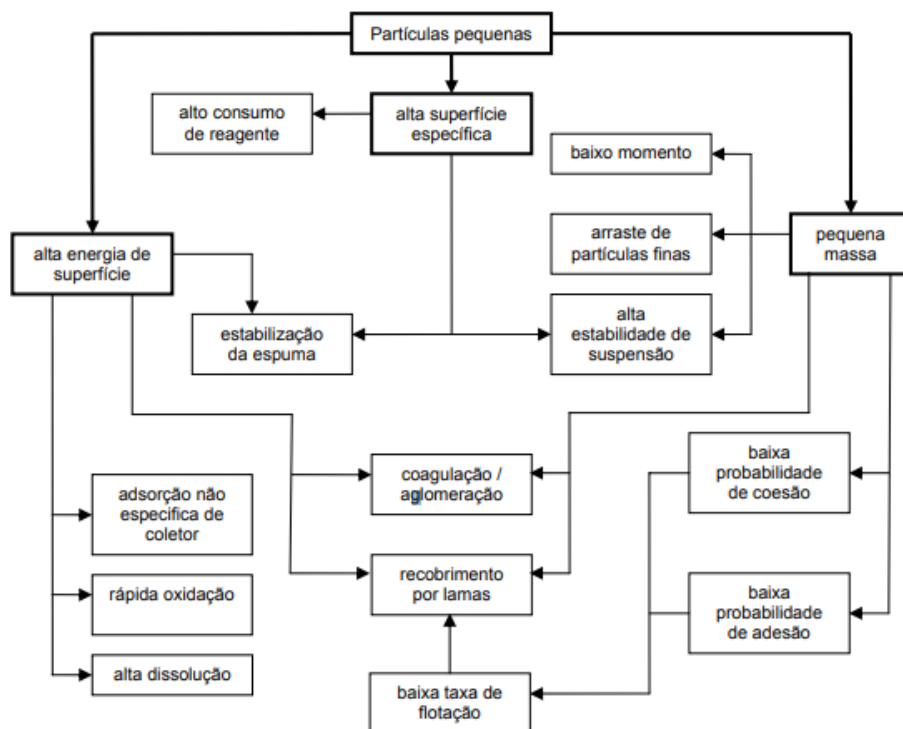
O método convencional de flotação por espuma deixa de ser efetivo e seletivo para partículas menores que 10 μm . As partículas nessa faixa possuem baixa inércia e tendem a seguir as linhas de fluxo do líquido ao redor da bolha, o que diminui a probabilidade de colisão entre as bolhas e partículas (ROCHA & PERES, 2008).

SIVAMOHAN (1990) afirma que as partículas finas são problemáticas principalmente devido à baixa massa e área superficial alta. A baixa massa pode acarretar na heterocoagulação, baixo momento linear, arraste de partículas, baixa probabilidade de colisão com a bolha, dificuldade de superar a barreira de energia entre partícula/partícula e partícula/bolha. Com relação à área superficial alta, esta leva a uma alta taxa de dissolução na água, adsorção de grande quantidade de produtos químicos, levando a um maior consumo de reagentes, espuma rígida, polpa com alta viscosidade e *slime coating*, que seria o revestimento indesejável das partículas valiosas por finos e ultrafinos. Elas também apresentam alta energia superficial por

unidade de área, o que por sua vez levaria a uma possível adsorção não específica de reagentes, aumento da hidratação e da solubilidade.

A Figura 11 mostra algumas características físicas e químicas das partículas mais finas e o que podem acarretar no processo de flotação.

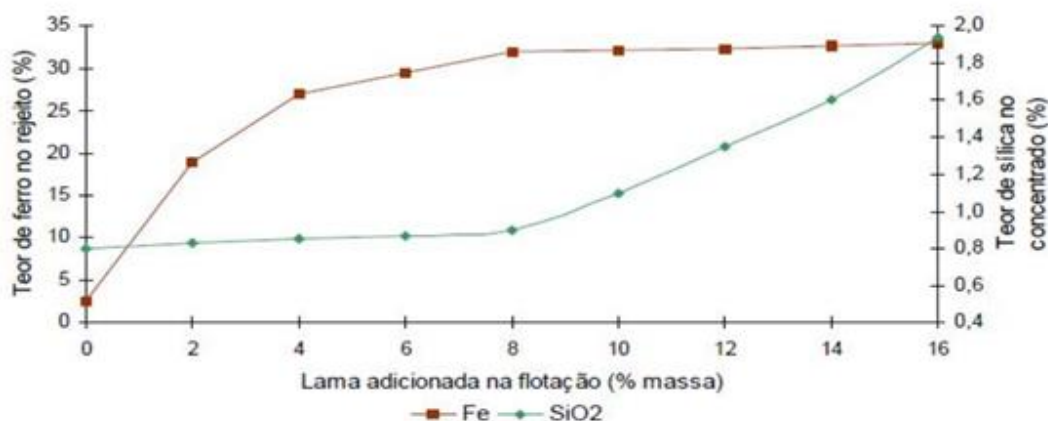
Figura 11 - Características de partículas finas e sua influência na flotação.



Fonte: KLASSEN & MOKROUSOV (1963)

As lamas podem ter ainda efeitos diferentes de acordo com a proporção que se apresentam e do mineral em questão. Com relação ao minério de ferro, RABELO (1994) quantificou este impacto, conforme Figura 12. Foi observado que o teor de sílica apresenta impacto significativo apenas a partir de maiores porcentagens de lama (>8 %) enquanto, para o teor de ferro, já se verifica um efeito negativo em baixas porcentagens (>2 %).

Figura 12 - Efeito do percentual de lamas na flotação.



Fonte: Adaptado de RABELO (1994).

Conforme exposto por SIVAMOHAN (1990) bolhas menores, maior tempo de residência, fluxos opostos de partículas e bolhas e maior agregação podem aumentar a taxa de flotação. Com base neste cenário, algumas técnicas voltadas para a flotação de partículas finas e ultrafinas serão abordadas neste tópico.

A floculação por cisalhamento, é uma técnica na qual partículas com alta carga superficial são agregadas sob condições de alto cisalhamento. A agitação auxilia ao fornecer um campo de cisalhamento com energia suficiente para que as partículas superem a barreira energética repulsiva entre as mesmas e se agreguem, além de aumentar a colisão entre bolha e partícula (BILGEN & WILLS, 1991).

No caso da flotação transportadora, esse método é baseado na adsorção – intencionalmente promovida – de finos previamente hidrofobizados sobre as partículas mais grossa ou vice-versa. Nos resultados apresentados por FUERSTENAU *et al.* (1988), houve um ganho tanto na recuperação quanto no teor ao utilizar partículas maiores de hematita. A recuperação máxima foi obtida com 40 % de hematitas grossas adicionadas em peso.

Segundo TESTA (2008), quando se utiliza a mesma espécie mineral como carreadora, esse processo se trata de uma homoagregação e a flotação será chamada de autotransportadora. A heteroagregação seria quando são espécies diferentes e nesse caso a flotação é chamada transportadora.

Existem estudos para a avaliação da possibilidade de se utilizar partículas plásticas poliméricas como carreadoras dos finos. RUBIO & HOBBERG (1993) utilizaram polipropileno, previamente hidrofobizado com ácido oleico. Neste caso, foi necessária uma etapa de separação das partículas através de agitação em solução alcalina.

Segundo SIVAMOHAN (1990), existem ainda vantagens em se utilizar o mesmo mineral que o da partícula fina, uma vez que não é necessário separar o fino agregado da partícula carreadora.

FUERSTENAU *et al.* (1988) estudaram a flotação de partículas finas de hematita utilizando a floculação por cisalhamento e em um segundo caso a flotação carreadora com a adição de partículas carreadoras maiores de hematita. O pH utilizado foi 3,0 e o coletor dodecilsulfato de sódio. No primeiro foi observado que aumentando a taxa de cisalhamento, verifica-se a formação de partículas maiores, mas que com o aumento contínuo, acima de certa taxa, os flocos podem quebrar-se, sendo que para este tipo de floculação é importante a estabilidade do floco. Porém, quando se trata de partículas menores que 4 μm , estas continuam a diminuir nas faixas testadas. Uma queda na recuperação pode ser causada pelo fato de que partículas mais grossas possuem maior cinética de flotação e são removidas antes que possam agregar-se às mais finas. Ressalta-se ainda que o tempo de condicionamento não foi suficiente para promover a floculação. Então, sugere-se uma etapa prévia de flotação sob agitação em uma taxa que promova a formação dos flocos. Na condição de 1200 rpm foi possível um ganho de recuperação de quase 20 % nos tempos de flotação mais curtos. Uma condição importante é que o floculante utilizado não promova a formação de flocos juntamente ao material de ganga.

A floculação seletiva consiste na técnica de agregar seletivamente as partículas de um determinado mineral. Normalmente é usado um polímero com alto peso molecular por interação eletrostática ou pontes de hidrogênio. Como esses tipos de interação são possíveis com vários minerais, há um problema em alguns casos em alcançar a seletividade necessária (SOMASUNDARAN *et al.*, 1996). KUMAR & MANDRE (2017), conduziram estudos com lamas de minérios de ferro utilizando floculação seletiva. Como floculantes foram utilizados poliacrilamida (não-iônica) e goma guar. Os principais minerais constituintes eram hematita, goethita e limonita e a ganga

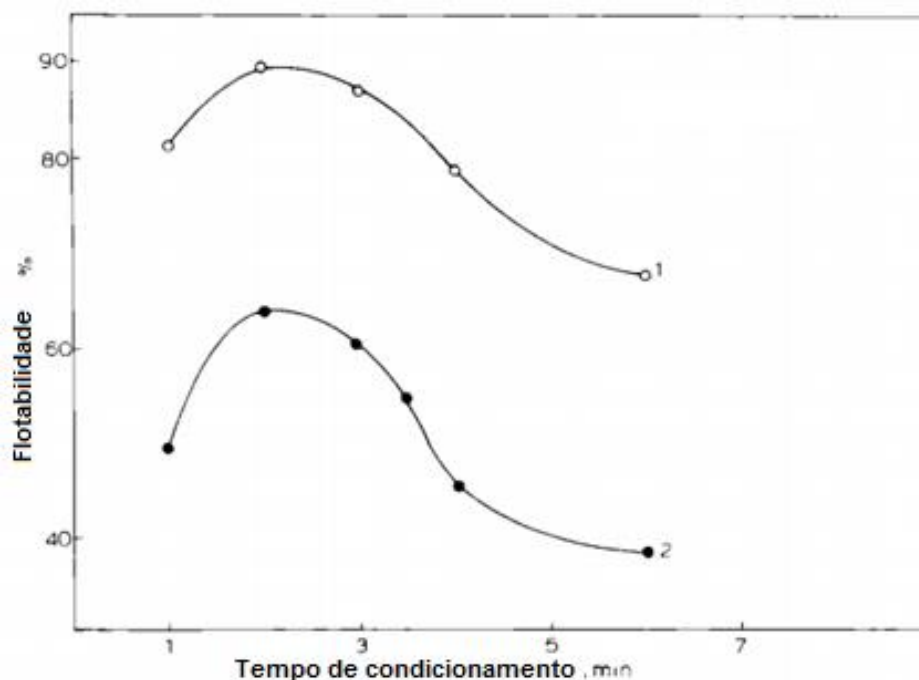
composta principalmente de silicatos como caulinita e quartzo. Para a poliacrilamida o máximo teor de ferro alcançado foi 64,6 % e uma recuperação de 66,33 % em massa, e para a goma guar o teor máximo de ferro foi 63,2 % e a recuperação 68,08 % em massa. Também foi estudado o efeito de lavar os flocos, após quatro estágios de lavagem, o teor de ferro aumentou 2,99 % quando se utilizou poliacrilamina e 2,60 % para a goma guar.

A flotação em coluna é uma técnica voltada para proporcionar uma maior probabilidade de colisão entre bolha e partícula, uma vez que as bolhas passam por uma suspensão de sólidos em contracorrente, tornando o sistema mais compatível com a concentração de partículas mais finas (PITA, 2001). De acordo com SOMASUNDARAN (1986) a coluna tem apresentado resultados melhores quando comparada com a flotação convencional em células mecânicas para, por exemplo, grafite contendo argila.

A eletroflotação consiste na geração de bolhas através da quebra eletrolítica da água, gerando bolhas pequenas de hidrogênio e oxigênio. A técnica auxilia a probabilidade de encontro da bolha com a partícula, ao gerar bolhas menores por eletrólise e é particularmente atrativa, pois o tamanho das bolhas pode ser controlado pela densidade da corrente, material e geometria do eletrodo (KETKAR *et al.*, 1991; JIMÉNEZ *et al.*, 2010).

RAJU & KHANGAONKAR (1982) realizaram testes de eletroflotação utilizando o tubo de Hallimond modificado com finos de calcopirita, abaixo de 20 μm . Foram utilizados sistemas de ânodo de platina – cátodo de cobre e ânodo de grafite – catodo de cobre, o coletor utilizado foi o etilxantato de potássio. A Figura 13 expõe que o sistema utilizando oxigênio apresentou resultados de flotabilidade entre 70 % e 90 % para finos de calcopirita.

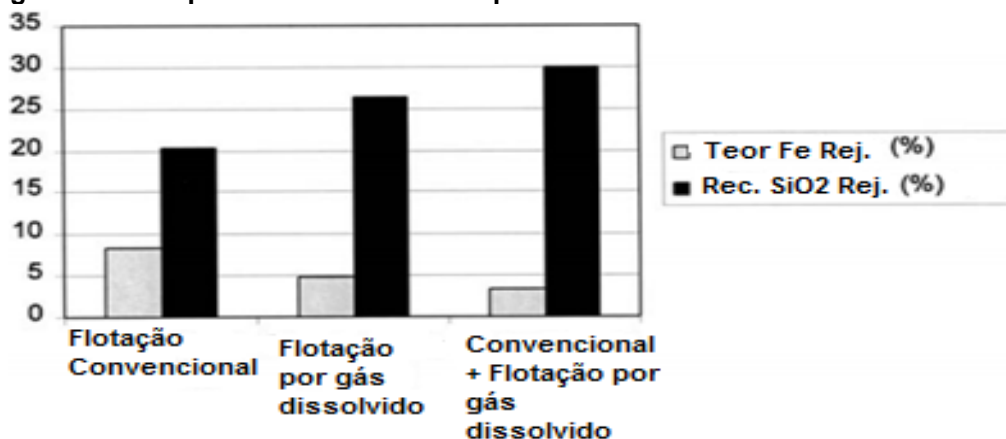
Figura 13 - Flotabilidade versus Tempo de condicionamento. 1. Oxigênio 2. Hidrogênio



Fonte: Adaptado de RAJU & KHANGAONKAR (1982).

De acordo com YALCIN *et al.* (2002), na flotação por ar dissolvido as bolhas são resultado da cavitação do líquido pela redução de pressão. Este método, segundo os autores, pode ser aplicado em minério de ferro, especialmente no caso de partículas finas e ultrafinas. As bolhas geradas por esse método apresentam nucleação em partículas hidrofóbicas e são muito menores quando comparadas com as convencionais, sendo que ambos podem também ser combinados. A Figura 14 mostra um comparativo entre os métodos de flotação utilizados, evidenciando os ganhos ao utilizar a flotação por ar dissolvido.

Figura 14 - Comparativo entre as desempenhos dos diferentes métodos utilizados



Fonte: Adaptado de YALCIN *et al.* (2002)

3.10 Separação densitária

Segundo WILLS & NAPIER-MUNN (2006) os métodos densitários são usados em uma ampla gama de materiais e de faixa de tamanhos, em alguns casos até menores que 50 μm . A propriedade diferenciadora explorada é a densidade ou peso específico dos minerais. Apesar de a aplicação deste método ter diminuído com o desenvolvimento do processo de flotação, o mesmo possui vantagens como baixo custo de investimento e não utilização de produtos químicos.

FIGUEIREDO & CHAVES (1998) afirmam que para este tipo de operação, as partículas abaixo de 74 μm já são analisadas como finas, visto que estas já se comportam como parte do fluido. SIVAMOHAN & FORSSBERG (1985), sugerem uma classificação específica para separação densitária de acordo com a faixa granulométrica (Tabela 4).

Tabela 4 - Classificação de tamanho de partículas adotada por Sivamohan & Forssberg de acordo com a granulometria para concentração gravítica.

Classificação	Granulometria
Grossas	Maior que 500 μm
Intermediárias	Menor que 500 μm
Finas	Menor que 100 μm
Muito finas	Menor que 20 μm
Ultrafinas	Menor que 5 μm
Coloides	Menor que 0,2 μm

Fonte: Sivamohan & Frossberg (1985)

GELDENHUIS (2002) estudou a recuperação de níquel de pós oriundos do processo de produção do aço, com d_{50} de 0,6 μm , utilizando as separações gravítica e magnética. Apesar de a separação magnética ter apresentado maiores valores de recuperação, a separação gravítica utilizando mesa oscilatória alcançou aproximadamente 40 % de recuperação, com relação ao teor houve acréscimo de 1,66 % para 7,06 %.

SRIVASTAVA *et al.* (2001) avaliaram a utilização de hidrociclone em conjunto com concentradores helicoidais em dois estágios para a concentração de finos de minério de ferro, sendo que cerca de 80% em massa das partículas tinham tamanhos abaixo de 110 μm . Foi realizada uma etapa de deslamagem via hidrociclone previamente à

etapa de concentração gravítica. Observou-se que com 20 % de sólidos foi possível alcançar 64,17 % de ferro, recuperação de 53,7 % e decréscimo do teor de alumina.

3.11 Separação magnética

A separação magnética é um processo de separação que se baseia na característica de diferença de susceptibilidade magnética das espécies. Esta determinará o comportamento do material quando submetido a gradiente de campo magnético.

TARLING & HROUDA (1993) dividem as propriedades magnéticas dos materiais em cinco grupos distintos, são eles: diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos. De acordo com esta classificação, os dois primeiros possuem menor ou nenhuma susceptibilidade magnética e os posteriores possuem maior susceptibilidade.

Os minerais ferromagnéticos são fortemente atraídos até por ímas comuns, já os paramagnéticos são fracamente atraídos e os diamagnéticos são repelidos pelo campo magnético, uma vez que possuem susceptibilidade magnética negativa (SAMPAIO *et al.*, 2010). A Tabela 5 exhibe a susceptibilidade magnética de alguns minerais recorrentes em lamelas de aciaria.

Tabela 5 - Classificação de susceptibilidade magnética de minerais em temperatura ambiente.

Mineral	Classificação	Faixa de campo (T)
Magnetita	Ferromagnético	0,05 a 0,5
Franklenita	Magnético	0,5 a 1,0
Hematita	Fracamente ferromagnético	1,0 a 1,8
Wustita	Muito fracamente magnético/Paramagnético	Acima de 1,8
Calcita	Não magnético/Diamagnético	-
Grafita	Não magnético/Diamagnético	-

Fonte: Adaptado de CORNELL & SCWERTMANN (2000); SAMPAIO *et al.* (2010)

KING (2001) afirma que, através do controle da intensidade do campo magnético, usando-se eletroímãs e variando a corrente elétrica, é possível realizar uma separação magnética seletiva, uma vez que minerais com baixa susceptibilidade

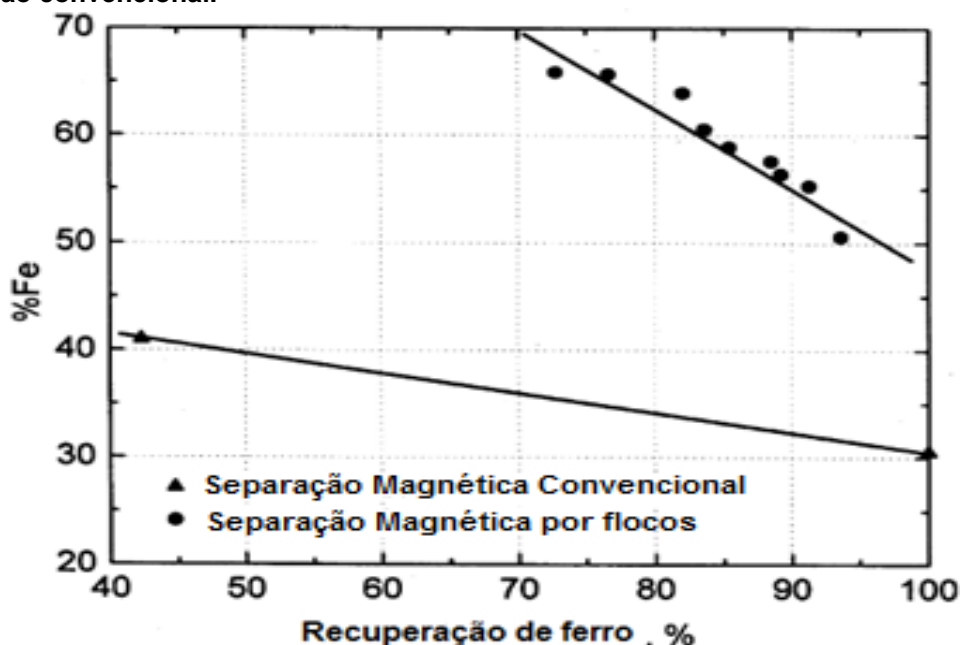
magnética precisam de altos gradientes de campo e o oposto para os que apresentam alta susceptibilidade magnética, que são atraídos já em baixos gradientes.

Deve-se alertar que, a rigor, o diamagnetismo é propriedade inerente à matéria, em conformidade com a lei de Lenz. Entretanto, dada a baixa intensidade da força de repulsão induzida pela tentativa de imergir o corpo material em gradiente de campo magnético, o diamagnetismo fica completamente camuflado em corpos paramagnéticos e ferromagnéticos, uma vez que as forças induzidas pelo paramagnetismo e ferromagnetismo são muito mais intensas.

Conforme exposto por JENA *et al.* (2014) técnicas de separação magnética são utilizadas para a concentração de lamas que são geradas nos processos de concentração de minérios de ferro. No estudo desses pesquisadores foram aplicados ensaios de separação magnética com estágios *rougher* e *cleaner* após série de ciclonagem. A amostra possuía 55% das partículas abaixo de 74 μ m. O produto final possuía aproximadamente 63% de Fe contido com uma recuperação em massa de 70,7%.

SONG *et al.* (2002) induziu a floculação de finos de hematita e limonita utilizando oleato de sódio e querosene. O processo denominado separação magnética de flocos demonstrou um ganho de desempenho para a recuperação destas partículas finas em campo de média intensidade em relação a recuperação magnética convencional em condições igualitárias (Figura 15).

Figura 15 - Comparação entre recuperação concentrados por separação magnética com flocos e separação convencional.



Fonte: Adaptado SONG *et al.* (2002)

RAO *et al.* (2015) propôs uma rota de beneficiamento para aproveitamento de finos de minério de ferro no alto forno. A amostra foi recebida com 83 % (em massa) das partículas menores que 37 μ m. A rota consistiu em uma etapa de deslamagem para remover as partículas finas de argilominerais, em seguida procedeu-se testes de separação magnética, sendo o melhor desempenho obtido com intensidade do campo magnético de 1,3 T.

A utilização de colóides de magnetita para o recobrimento de partículas finas de minério de ferro foi abordado por SINGH *et al.* (2015). Foram analisados os efeitos da concentração de magnetita coloidal, pH e intensidade do campo. Os melhores resultados geraram concentrado com 62,7 % de ferro, com recuperação de 72 %, os minerais de ganga silico aluminosos, acusaram teor aparentes de 2 % e 3,5 % de Al₂O₃, respectivamente. Tais condições foram atingidas em pH 7 e com a concentração de colóides entre 10 e 40 g/t sob 1,2 T. Nas mesmas condições, mas com ausência dos colóides de magnetita a recuperação de ferro reduziu-se para 64,4%.

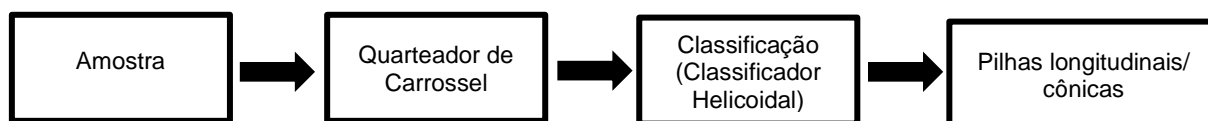
4- MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo aborda os métodos que foram aplicados à pesquisa em epígrafe. Compreendem a caracterização granulométrica, química, mineralógica e morfológica da amostra recebida e concentrados de processos, além de testes, que consistem em métodos exploratórios para recuperação das fases de interesse. Uma descrição detalhada destas atividades está exposta nos próximos itens.

4.1 Amostras para ensaios de caracterização e processo

Foram recebidos aproximadamente 230 kg de lama de aciaria, proveniente de uma empresa de reaproveitamento de resíduos siderúrgicos do estado de Minas Gerais. A massa foi submetida a quarteamento através de quarteador do tipo carrossel localizado no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas – DEMIN da Universidade Federal de Ouro – UFOP. O material foi classificado em meio fluido através de classificador do tipo helicoidal. Foram utilizados 40 L de polpa à 30 % de sólidos utilizando o hexametáfosfato de sódio como dispersante na concentração de 1200 g/t de sólidos. Após a secagem do *underflow* e *overflow*, a sequência do quarteamento se deu através de quarteadores do tipo Jones, pilhas alongadas e cônicas até que se fosse atingida a massa necessária à etapa em questão.

Figura 16 - Esquema de quarteamento de amostras.



Fonte: O autor (2021)

4.2 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica foi avaliada em duplicata através de peneiramento a úmido em um peneirador vibratório suspenso da marca Denver do Laboratório de Tratamento de Minérios do DEMIN/UFOP. A porção mais fina, com granulometria abaixo de 37 μm , teve sua curva de distribuição granulométrica descrita por granulômetro a *laser* da marca Cilas 1064 de propriedade do Laboratório de Propriedades Interfaciais do DEMIN/UFOP.

Em seguida foi analisada a aderência dos resultados obtidos junto aos modelos teóricos de distribuição Rosin-Rammler (Equação 1), Harris (Equação 2) e Hill (Equação 3).

$$Y(x) = 1 - \text{Exp} \left[\ln \left(\frac{1}{2} \right) \times \left(\frac{x}{x_{50}} \right)^n \right] \quad [\text{Rosin-Rammler}] \quad (1)$$

Onde: n — parâmetro de assimetria da distribuição [-]; x_{50} — diâmetro médio [m].

$$Y(x) = 1 - \left[1 - \left(\frac{x}{x_{max}} \right)^a \right]^b \quad [\text{Harris}] \quad (2)$$

Onde: a — expoente de Gaudin-Meloy [-]; b — expoente de Harris [-]; x_{max} — tamanho máximo da distribuição [m] (se $a = 1$, então adotam-se os resultados da distribuição de Gates-Gaudin-Schumann; e se $b = 1$, então adotam-se os resultados da distribuição de Gaudin-Meloy).

$$Y(x) = \frac{x^k}{x^k + x_{50}^k} = \frac{\left(\frac{x}{x_{50}} \right)^k}{\left(\frac{x}{x_{50}} \right)^k + 1} \quad [\text{Hill}] \quad (3)$$

Onde: k — parâmetro de assimetria da distribuição [-]; x_{50} — diâmetro médio [-].

Os parâmetros de regressão foram estimados utilizando um modelo não linear contido em um pacote do *software* Easyplot®.

4.3 Massa específica

As massas específicas reais foram determinadas por meio de duas metodologias de picnometria.

A técnica via úmido foi adotada através de picnômetros de 10 e 50 ml. Utilizou-se a água destilada como fluido para as partículas que compuseram o *underflow* pós classificação. As dispersões foram mantidas em banho maria (70 °C) por 15 minutos para evitar a formação de bolhas de ar. Com relação as análises em que a partículas eram provenientes do *overflow*, adotou-se o álcool como fluido devido ao caráter hidrofóbico apresentado pelas mesmas. A análise consistiu em preencher o picnômetro parcialmente com sólidos e álcool em seguida utilizar bomba a vácuo para

garantir a inexistência de bolhas de ar no interior da mistura, em seguida o picnômetro era completamente preenchido e a medida era realizada.

O segundo método adotado empregou-se o picnômetro a gás (hélio), fabricado pela Quantachrome, modelo Ultrapyc1200e, disponível no Laboratório de Propriedades Interfaciais do DEMIN/UFOP.

4.4 Análise morfológica

O aspecto morfológico das estruturas presentes no resíduo foi estudado pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) integrada a um microanalisador de composição química elementar, um espectrômetro dispersivo em energia (EDS). O equipamento utilizado foi um microscópio eletrônico de varredura de bancada da marca Phenom[®]. Todas as análises foram realizadas no laboratório da empresa brasileira representante da marca Phenom[®], Nova Analítica Importação Exportação Ltda.

4.5 Área superficial

A análise da área superficial específica se deu por meio da técnica BET de adsorção de nitrogênio, utilizando um analisador de área superficial, equipamento BET NOVA 1200e (com aquisição de dados pelo *software* NovaWin2) da Quantachrome de propriedade do Laboratório de Propriedades Interfaciais do DEMIN/UFOP.

Para realizar tal medição, empregou-se uma amostra de 6,750 g. A preparação da mesma consistiu de degaseificação a vácuo, a 196 °C, por 4 h, para remoção de umidade e contaminantes presentes na amostra. Após esse procedimento inicial, pesou-se o porta-amostra com a amostra para obtenção da massa da amostra seca degaseificada. Em seguida, a célula foi transferida para o compartimento de análise. Nesta etapa, ela é parcialmente submersa em nitrogênio líquido. Então o adsorbato (nitrogênio gasoso) é injetado, em etapas, no interior da célula para realização das medidas, sempre havendo a monitoração na variação de pressão. Após a obtenção de pressão constante, o nitrogênio adsorvido na amostra foi quantificado. A isoterma

fornecida (8 pontos) relaciona o volume de gás adsorvido em função da pressão relativa. O tempo de análise foi por volta de 50 minutos.

4.6 Identificação de fases cristalinas

A identificação das fases cristalinas foi por meio da difratometria de raios X, utilizando o método do pó total. A amostra foi pulverizada a uma faixa de tamanho abaixo de 37 μm . A análise foi realizada em duas etapas, a primeira consistiu em submeter a amostra tal qual. Com relação a segunda etapa, a alíquota foi preparada com um ataque utilizando ácido clorídrico (HCl). O processo consistiu em atacar a alíquota com HCl 1:1 e em seguida realizar a eliminação da solução ácida por evaporação na chapa térmica a 100 °C. O processo se repetiu por duas vezes. O ataque teve como objetivo solubilizar os óxidos de ferro e carbonatos para que o fenômeno de sobreposição de picos fosse minimizado.

O equipamento utilizado foi o difratômetro X'Pert3Powder da marca PANalytical com tubo de cobre ($K_{\alpha}\text{Cu} = 1,5 \text{ \AA}$) e filtro de níquel para radiação k_{β} com intervalo 2θ entre 5 e 90°. O mesmo pertence ao Laboratório de Microscopia Ótica e Difração de Raios X do DEMIN/UFOP.

4.7 Análise Termogravimétrica

A caracterização do perfil térmico da lama de aciaria em atmosfera inerte, foi por meio da análise de TGA, utilizando o equipamento TGA, marca TA Instruments, modelo Q50 do Laboratório de microscopia ótica e difração de raios X localizado no departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

4.8 Análises químicas

4.8.1. Análise amostra global

A análise química da amostra tal qual se deu por meio espectroscopia de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP). O equipamento é de posse do Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geologia (DEGEO) da UFOP. Para a análise foi feita a abertura da amostra (digestão). No presente estudo, a digestão

realizada foi parcial, ou seja, nem todos os componentes da amostra foram solubilizados. A etapa foi realizada conforme metodologia, a seguir:

- I. Pesar $0,2500 \pm 0,001$ g da amostra no interior de um frasco Savillex;
- II. Adição de 1 ml de HNO_3 10 mol/l seguido de 3 ml de HCl 10 mol/l;
- III. Levar a secura (aberta) sobre placa aquecedora a cerca de 110°C ;
- IV. Adição de 2 ml de HF concentrado, manter o frasco fechado e manter o mesmo por 30 horas na placa aquecedora com temperatura de 110°C .
- V. Aguardar o resfriamento e levar a secura (aberta) em placa aquecedora à cerca de 110°C .
- VI. Adição de 2 ml de HNO_3 10 mol/l e levar à secura em aberto;
- VII. Repetir o passo anterior;
- VIII. Adição de 2 ml de HCl 10 mol/l e levar à secura em aberto;
- IX. Adicionar 25 ml de HCl 2 mol/l e fechar os frascos, e após agitação deixar os mesmos sobre placa aquecedora a cerca de 110°C .

4.8.2. Quantificação do Ferro total

Com o intuito de quantificar a fração de ferro total procurou-se por métodos expeditos de quantificação do elemento. Sendo assim, o procedimento selecionado foi através da redução do ferro por cloreto de titânio (III), conforme NBR ISO 9507.

Segundo ABNT (2003), o procedimento exposto pela norma, consiste na redução de Fe^{3+} por cloreto estanhoso e cloreto de titânio (III). Realiza-se a pesagem da amostra e posteriormente sua abertura na presença do cloreto de estanho e o cloreto de titânio. É realizada uma titulação baseada numa reação de oxi-redução entre o titulado (Fe^{2+}) e o titulante (dicromato de potássio).

Em seguida foi empregado uma análise de correlação entre os teores de Fe obtidos pela análise da NBR ISO 9507 com a massa específica da alíquota, assim sendo possível extrapolar os demais resultados.

4.9 Ensaio de dispersão de polpa

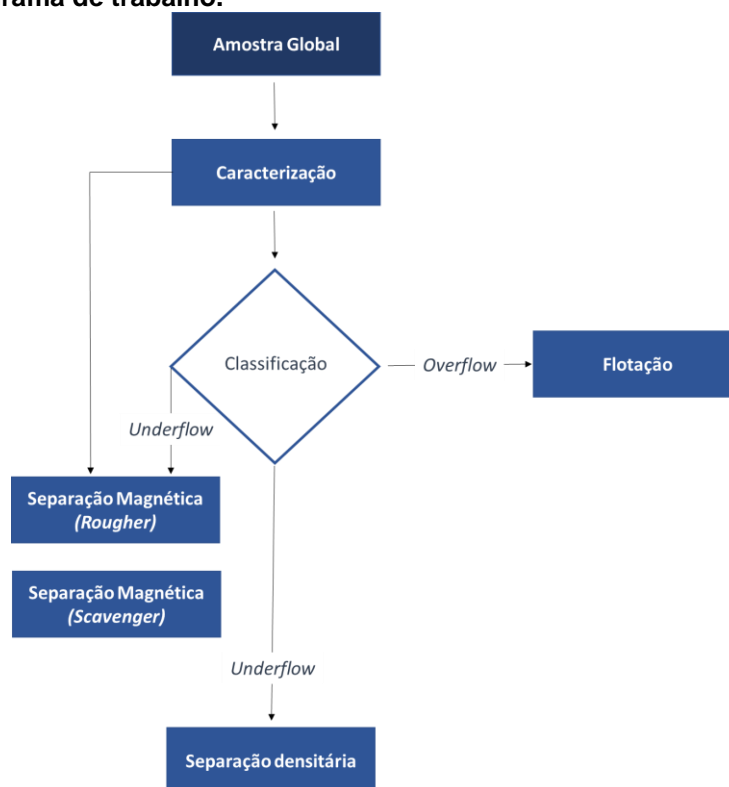
Nos ensaios de dispersão, foi empregada a pipeta de Andreasen de propriedade do Laboratório de Reologia do DEMIN/UFOP, empregando-se uma concentração mássica de 10%. Foram avaliados como dispersantes o silicato de sódio, o metassilicato de sódio e o hexametáfosfato de sódio em condição de pH natural (9,3). As dosagens foram idênticas para todos os reagentes em questão (200, 400, 600, 800, 1000 e 1200 g/t). Houve ainda ensaios com variação de pH de polpa controlado pela adição de NaOH, sem a presença de aditivos, sendo analisados os valores de 8, 9, 10 e 11.

O ensaio consistia em realizar a agitação da polpa na condição determinada e em seguida permitir que a mesma entrasse em regime de sedimentação por 4 horas. Após este período, 10 ml do sobrenadante era coletado em altura fixa e sua turbidez era medida, com o turbidímetro Plus Microprocessado (ALFAKIT), permitindo assim a avaliação da estabilidade termodinâmica da suspensão.

4.10 Ensaio de concentração exploratórios

Para a avaliação do comportamento das amostras em processos de beneficiamento mineral, depois de classificado o material foi submetido a ensaios de concentração gravimétrica, de separação magnética, além de ensaios de flotação em escala de bancada e coluna. O circuito avaliado está presente na Figura 17.

Figura 17 - Fluxograma de trabalho.



Fonte: O autor (2021).

4.10.1. Separação densitária

Os ensaios de separação densitária foram realizados com o *underflow* oriundo da etapa de classificação utilizando jigge convencional e mesa oscilatória adaptada. Os parâmetros adotados estão expressos na Tabela 6.

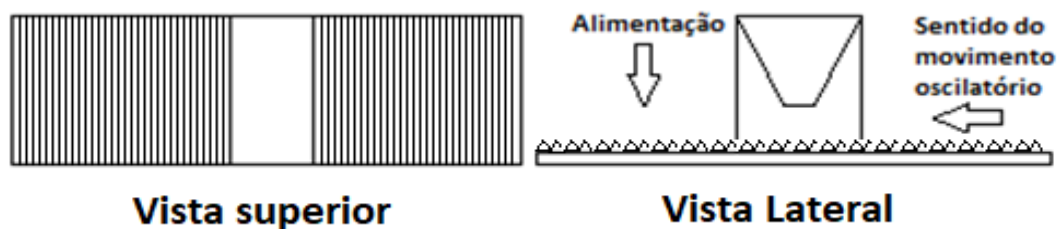
Tabela 6 - Condições de ensaios densitários.

Jigge		Mesa Oscilatória	
Área do crivo (cm ²)	15	Ângulo (°)	2
Vazão de sólidos (kg/min)	0,174	Vazão de sólidos (kg/min)	0,217
Vazão de água de diluição (ml/min)	0,450	Vazão de água de diluição (ml/min)	0,111
Frequência (Hz)	40	Frequência (Hz)	8
Tempo de ensaio (min)	4,2	Tempo de ensaio (min)	4,6

Fonte: O autor (2021).

A mesa oscilatória possui alimentação central de maneira diluída, perpendicular ao movimento de oscilação. O equipamento possui rifles semelhantes aos presentes no modelo Wilfley. O croqui (fora de escala) da Figura 18 ilustra a mesa utilizada.

Figura 18 - Esquema mesa oscilatória.



Fonte: O autor (2021).

4.10.2. Separação magnética

Os ensaios de separação magnética se dividiram em duas etapas. A primeira etapa foi realizada através do separador de baixa intensidade de campo magnético do tipo tambor. A amostra de alimentação era condicionada por 5 minutos com 40 % de sólidos na presença de hexametáfosfato de sódio aplicando-se 1200 g/t e para a execução do ensaio a mesma era diluída a 30 % de sólidos. Realizou-se a variação da intensidade de campo magnético (0,050 e 0,075 T) e granulometria da alimentação (amostra tal qual e *undeflow* da etapa de classificação via classificador helicoidal). Os ensaios eram realizados até que não se houvesse mais material magnético a ser coletado.

A segunda etapa foi executada em duplicata trabalhando como *scavenger* (0,075 T) da etapa anterior. O equipamento utilizado foi o separador magnético de alto gradiente *Carpco Wet High-Intensity Magnetic Separator Model 3X4L*, utilizando matrizes esféricas (35, 27 e 30 mm) e intensidade de campo magnético (0,05, 0,075 e 0,1 T) como variáveis. As variáveis empregadas foram selecionados através de testes exploratórios, visando a possibilidade de realizar a separação sem que houvesse a retenção total da amostra e/ou entupimento dos intertícios nas matrizes. O condicionamento se deu de forma análoga à primeira etapa. A alimentação ocorreu em forma de polpa com concentração de sólidos de 35 %, incluindo ainda 500 ml de água de lavagem.

Ambos os equipamentos são de propriedade do Laboratório de Tratamento de Minérios do DEMIN/UFOP.

4.10.3. Testes de flotação em escala de bancada

O *overflow* oriundo da operação de classificação foi submetido à ensaios de flotação em escala de bancada, empregando-se célula mecânica modelo 1.000 CFB produzida pela Cimaq Indústria S.A. com cuba inox de 0,8 L.

Os experimentos de flotação foram realizados em duplicata utilizando-se de três diferentes composições de reagentes. A primeira composição de reagentes foi utilizando oleato de sódio como coletor e aplicando como variáveis a concentração de sólidos e o pH de flotação. Os ensaios se deram conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Arranjo de ensaios aplicados a flotação convencional em bancada usando ácido oleico como coletor.

Ensaio	Coletor (g/t)	Depressor (g/t)	pH	Porcentagem de sólidos (%)
1	900	-	9	30
2	1200	-	9	30
3	900	-	9	15
4	1200	-	9	15
5	900	-	8	15
6	1200	-	8	15

Fonte: O autor (2021).

A segunda composição de reagentes avaliada foi utilizando o mesmo oleato de sódio para a coleta de carbonatos trabalhando em conjunto com o pirofosfato de sódio como agente depressor para os minerais de ferro. A opção pela realização de flotação em pH natural baseou-se no ponto de alta e baixa flotabilidade de carbonatos e minerais de ferro, respectivamente, observados por Wang *et al.* (2018). O ordenamento dos ensaios foi de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 - Arranjo de ensaios aplicados a flotação convencional em bancada usando ácido oleico como coletor e pirofosfato de sódio como depressor.

Ensaio	Coletor (g/t)	Depressor (g/t)	pH	Porcentagem de sólidos (%)
1	900	100	9	15
2	900	200	9	15
3	900	600	9	15
4	900	1000	9	15
5	900	400	9	15
6	1200	200	9	15
7	1200	400	9	15
8	1200	600	9	15
9	1200	1000	9	15
10	1200	100	9	15

Fonte: O Autor (2021).

Já com relação a terceira composição de reagentes estudada, foram empregados com coletor e depressor o oleato de sódio e quebracho respectivamente. Foram adotadas como variáveis a dosagem de reagentes e o pH. Na Tabela 9 é mostrada a estrutura dos ensaios.

Tabela 9 - Arranjo de ensaios aplicados a flotação convencional em bancada usando ácido oleico como coletor e tanino como depressor.

Ensaio	Coletor (g/t)	Depressor (g/t)	pH	Porcentagem de sólidos (%)
1	900	200	8	15
2	1200	200	8	15
3	900	400	8	15
4	1200	400	8	15
5	900	200	9	15
6	1200	200	9	15
7	900	400	9	15
8	1200	400	9	15
9	1400	300	8	15
10	1400	300	9	15

Fonte: O autor (2021).

As variáveis resposta de interesse foram em todos os ensaios de flotação a recuperação metalúrgica e teor de Fe no concentrado.

O procedimento para a flotação em escala de bancada consistiu em:

- a) Preparação da solução de reagentes propostos;
- b) Preparação de polpa com volume de 0,8 L com 35 % de sólidos em massa;
- c) Agitação de polpa no período de dois minutos a 1200 rpm garantindo a suspensão e umectação dos sólidos;
- d) Adição do agente depressor e condicionamento por cinco minutos;
- e) Adição do agente coletor e condicionamento por cinco minutos;
- f) Adequação da concentração de sólidos e abertura da válvula de ar e remoção da fração flotada por cinco minutos;
- g) Filtragem e secagem dos produtos em estufa a 100 °C para a retirada da umidade;
- h) Quarteamento dos produtos visando a separar alíquotas para as análises químicas.

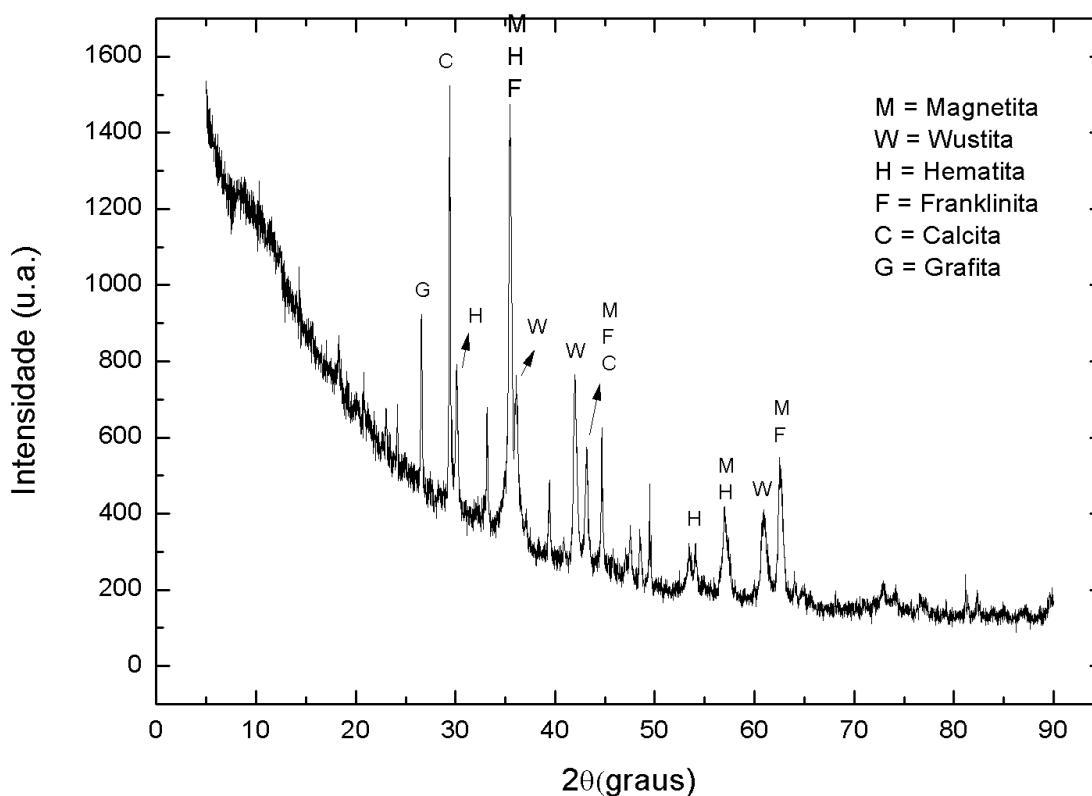
5- RESULTADOS

O presente trabalho foi realizado em duas etapas distintas, a primeira buscou-se elucidar as características morfológicas e de composição do material avaliado. Já a segunda, o foco foi determinar as respostas do material aos diferentes tipos de processos de concentração mineral.

5.1 Identificação de fases cristalinas

O difratograma gerado pela análise de raios X da amostra global está exposta na Figura 19. A análise revelou a presença das fases wustita (FeO), magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3), franklinita (ZnFe_2O_4), calcita (CaCO_3) e grafita (C_n).

Figura 19 - Padrão de difração da amostra



Fonte: O autor (2021).

Atendendo às expectativas em conformidade com a revisão da literatura (SOBRINHO, 2012; SILVA, 2006; APOCALYPSE, 2016; STEFANOVA & AROMAA, 2012),

detectou-se a presença massiva de óxidos de ferro. A magnetita e wustita são fases abundantes em lamelas de aciaria. Detectou-se também a presença de hematita, mas em menores quantidades. É importante ressaltar a presença de um alto *background* do difratograma devido à alta presença destes óxidos, o que pode ter interferido na identificação das fases cristalinas. O fenômeno pode ocorrer devido a interação entre tais fases e a radiação cúprica que foi empregada na análise em questão. Em função desta combinação a espécie emite radiação fluorescente que dá origem à característica citada.

Outro ponto importante é a possibilidade de fases amorfas interferirem no *background* da análise. Ao contrário do que ocorre com fases cristalinas, a incidência dos raios X em uma fase sem cristalinidade leva o espalhamento da radiação em várias direções, levando a uma grande protuberância em ampla faixa no difratograma ao invés de picos característicos (CULLITY & STOCK, 2013). FATHY *et al.* (2015) discorrem sobre a presença desse espalhamento para filmes finos de carbono amorfo transparente na incidência de fonte de cobre, o mesmo ainda relata a presença de estrutura grafítica com picos característicos entre 20 e 30 °.

SILVA (2006) discorre sobre a ocorrência de franklinita e magnetita como minerais pertencentes ao grupo dos espinélios. GRILLO (2011) e MARTINS *et al.* (2008) também detectaram a franklinita como um dos minerais com presença significativa.

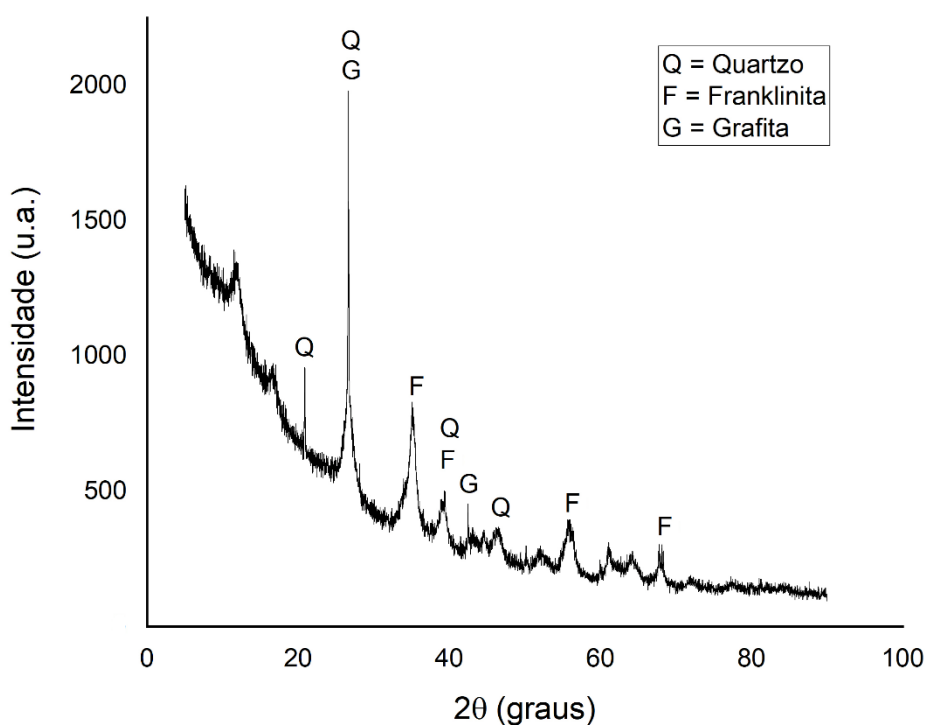
A calcita também foi observada em lamelas por APOCALYPSE (2016) e STEFANOVA & AROMAA (2012). Com relação à grafita, a sua presença está em conformidade com os estudos de GRILLO (2011).

No difratograma ocorre o fenômeno de sobreposição de pico entre magnetita e franklinita. Pesquisadores como SILVA (2006) e SOBRINHO *et al.* (2010) também detectaram tal fato em suas respectivas amostras.

O segundo difratograma (Figura 20) gerado expõe as fases presentes que são inertes ao ataque do ácido clorídrico. O difratograma ainda possui indício da presença de fase com baixa cristalinidade. Conforme a expectativa, a grafita, se mantém presente, pois não é atacado por este ácido (SKOOG, 1982), assim como a franklinita, que possui

dificuldade em ser lixiviada, conforme exposto anteriormente. O fenômeno de sobreposição foi minimizado e possibilitou a identificação de uma nova fase, sendo ela o dióxido de silício. A presença de SiO_2 pode ser inferida pelo arraste de refratários e escorificantes que possam ter sido utilizados durante o processo de fabricação do aço.

Figura 20 - Difratograma após ataque ácido.



Fonte: O autor (2021).

Existem picos que não foram identificados. Tipicamente uma fase cristalina necessita de uma concentração maior do que 2 % para ser identificado na presente técnica e, como ainda é possível observar o fenômeno de sobreposição, o detalhamento das fases cristalinas pode não ser inequivocamente assertivo. Para promover a acurácia da identificação, seria recomendado a realização de uma nova análise utilizando um maior deslocamento angular e um menor passo do equipamento, o que iria aumentar a quantidade de pontos analisados.

A complexa composição do pó de aciaria em questão é oriunda da utilização de diferentes materiais como insumos dos quais é possível citar os refratários, ferros-liga,

ferro-gusa, escorificantes e ainda a utilização de sucatas que na imensa maioria das vezes são provenientes de fonte externas ao processo.

A Tabela 10 apresenta uma comparação entre as fases cristalinas identificadas no presente trabalho com outros autores.

Tabela 10 - Identificação de fases.

Autores	Origem	Fases																
		Ferro Metálico	Wustita	Hematita	Magnetita	Quartzo	Zincita	Franklinita	Calcita	Halita	Silvita	Cal	Grafita	Cromita	Periclase	Ausmanita	Ferrita de zinco	Fluorita
BRUCKARD <i>et al.</i> (2005)	FAE ¹				X	X	X	X	X	X	X	X						
CRUELLS <i>et al.</i> (1992)	FAE			X	X	X	X		X				X					
MACHADO <i>et al.</i> (2006)	FAE				X	X	X	X						X	X	X		
LAFORREST & DUCHESNE (2006)	FAE			X	X													
KELEBEK <i>et al.</i> (2004)	LD ²		X	X													X	
VIEIRA <i>et al.</i> (2006)	LD	X	X		X				X									
MAJUSTE & MANSUR (2008)	LD			X	X				X					X				
APOCALYPSE (2016)	FAE	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X			
PAULO (2021)	FAE	X	X	X	X	X		X	X				X					

¹Aciaria que emprega forno a arco elétrico.

²Aciaria que emprega conversores LD.

Fonte: Adaptado de PAIS (2010).

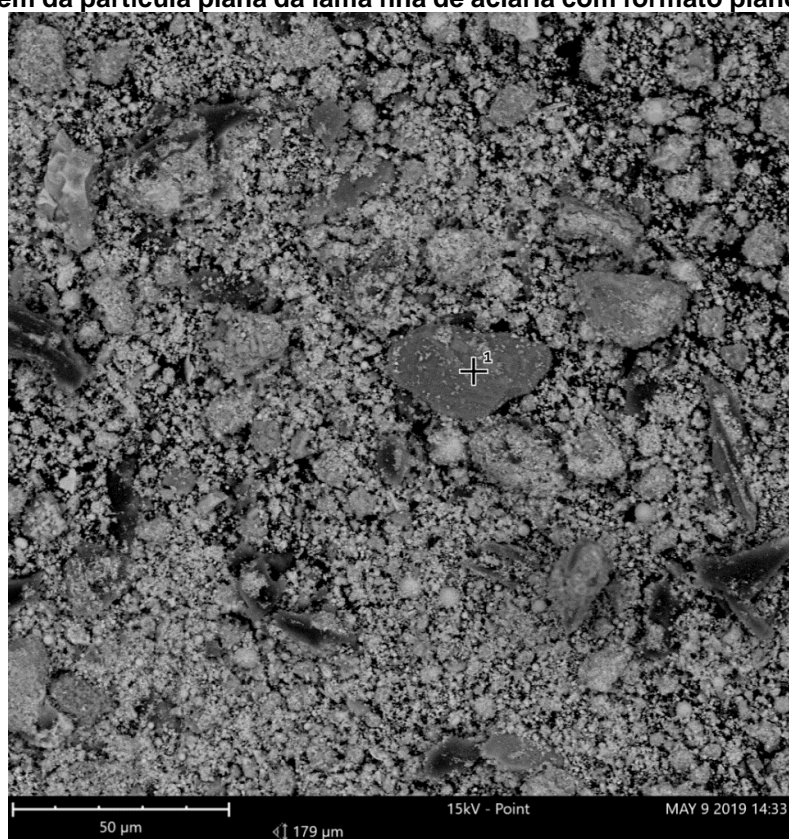
5.2 Análise morfológica

A análise morfológica utilizando microscópio eletrônico de varredura (MEV) permitiu avaliar alguns pontos distintos devido a complexa formação do material. Nas figuras Figura 21 e Figura 22, é possível verificar que a maior parte das partículas possuem formas irregulares, ainda existindo estruturas arredondadas, planas e dendríticas. Tais

estruturas estão em coerência com os trabalhos realizados por MONTOVANI *et al.* (1998) e SILVA (2006).

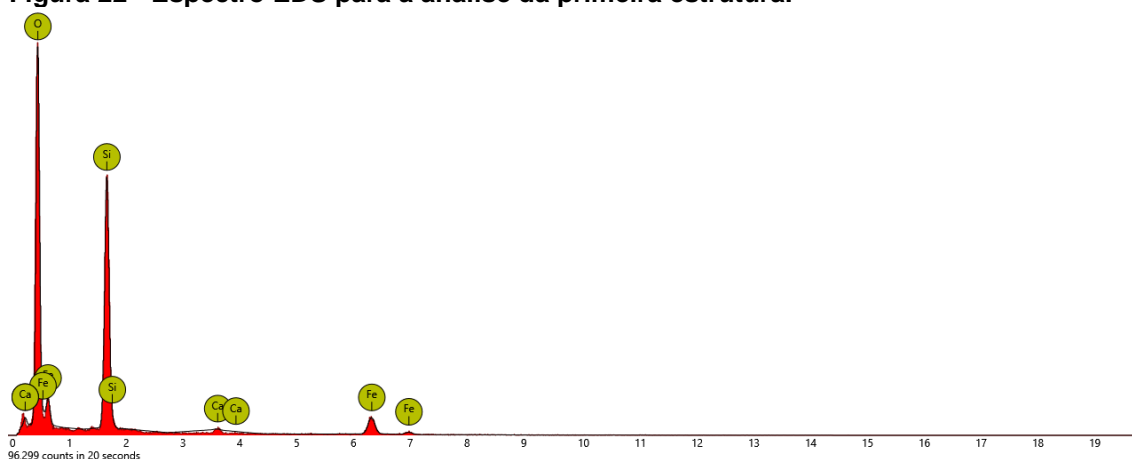
A Figura 21 apresenta uma estrutura plana (ponto 1). A análise semiquantitativa e pontual identificou essa estrutura composta principalmente de Si e O (Figura 22), o que pode indicar dióxido de silício, fase cristalina detectada na difração após o ataque com HCl. O mesmo também foi identificado por diversos autores (GRILLO, 2011; TSUBOUCHI *et al.*, 2010; DUTRA *et al.*, 2006; APOCALYPSE, 2016).

Figura 21 - Imagem da partícula plana da lama fina de aciaria com formato plano obtida em MEV.



Fonte: O autor (2021).

Figura 22 - Espectro EDS para a análise da primeira estrutura.

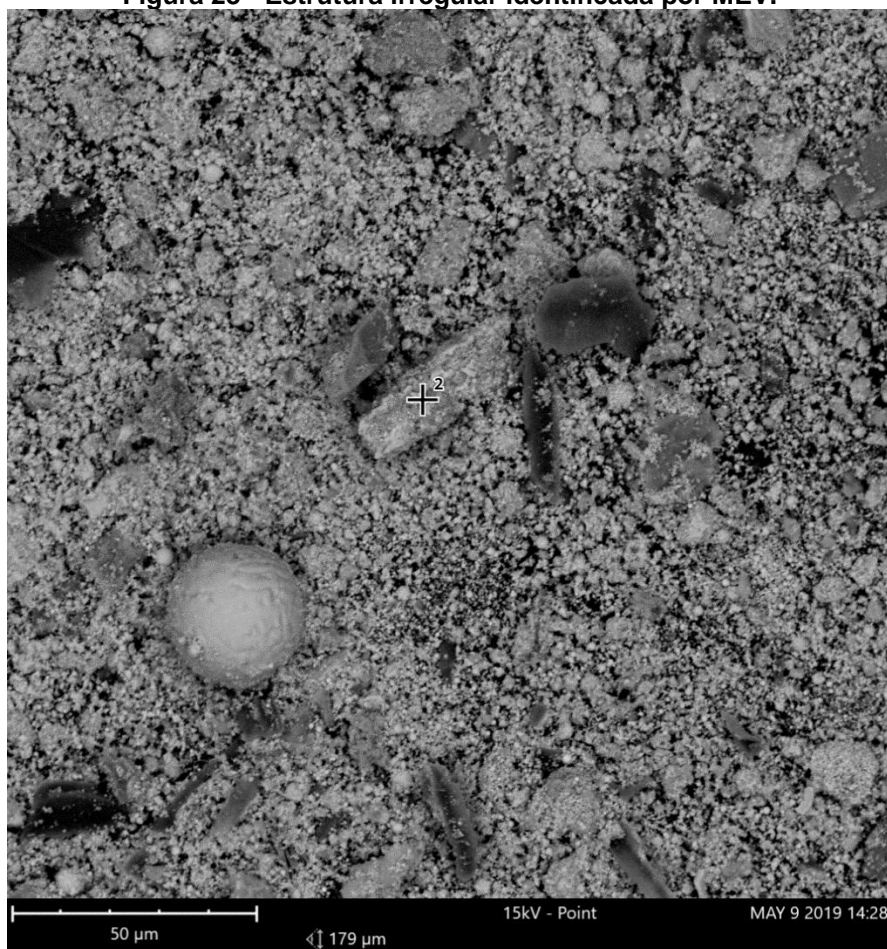


Fonte: O autor (2021).

A segunda estrutura analisada (ponto 2 da Figura 23), possui perfil irregular. A grande presença de O, Fe, Al e Ca (Figura 24) pode indicar a substituição do ferro em seus óxidos. BARCELLOS (2001) apontou que os cátions metálicos desses elementos foram observados substituindo parcialmente o Fe na estrutura da magnetita. O mesmo comportamento foi identificado nas poeiras analisadas por MACHADO *et al.* (2006).

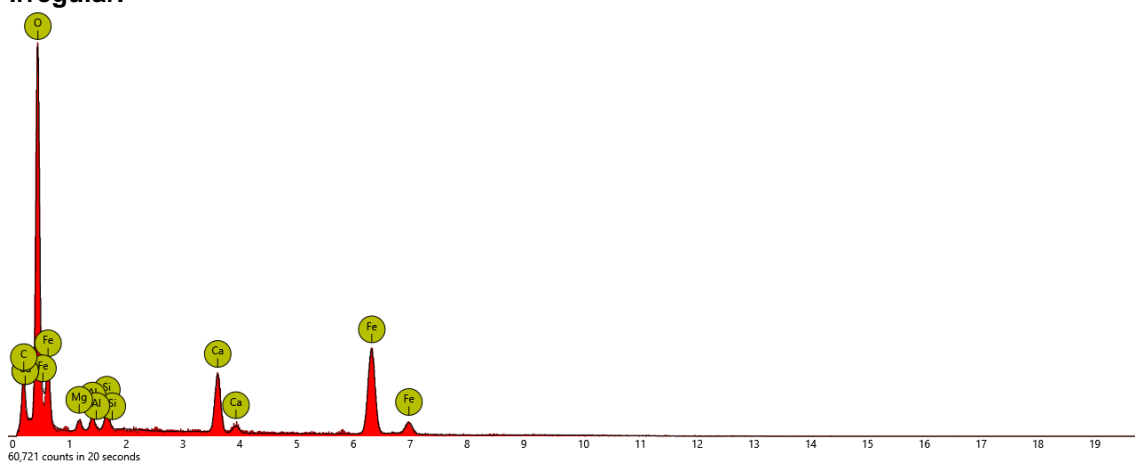
O terceiro ponto marcado indica uma estrutura arredondada, rica em oxigênio e ferro (ponto 3 da Figura 25). MACHADO *et al.* (2006) discorre sobre o mesmo tipo de estrutura, avaliando a possibilidade de se tratar de magnetita. Através do EDS, foi possível realizar a análise pontual desta partícula, demonstra-se na Figura 26 a incidência majoritária de Fe e O, com Ca, Si, Al e Mg em escalas bem menores. O formato esférico provém da origem do material, que se dá pela ejeção de partículas do metal líquido e da escória, formando um maciço de ferro metálico e posteriormente após oxidação forma a magnetita descrita pelo espectro (SILVA, 2006).

Figura 23 - Estrutura irregular identificada por MEV.



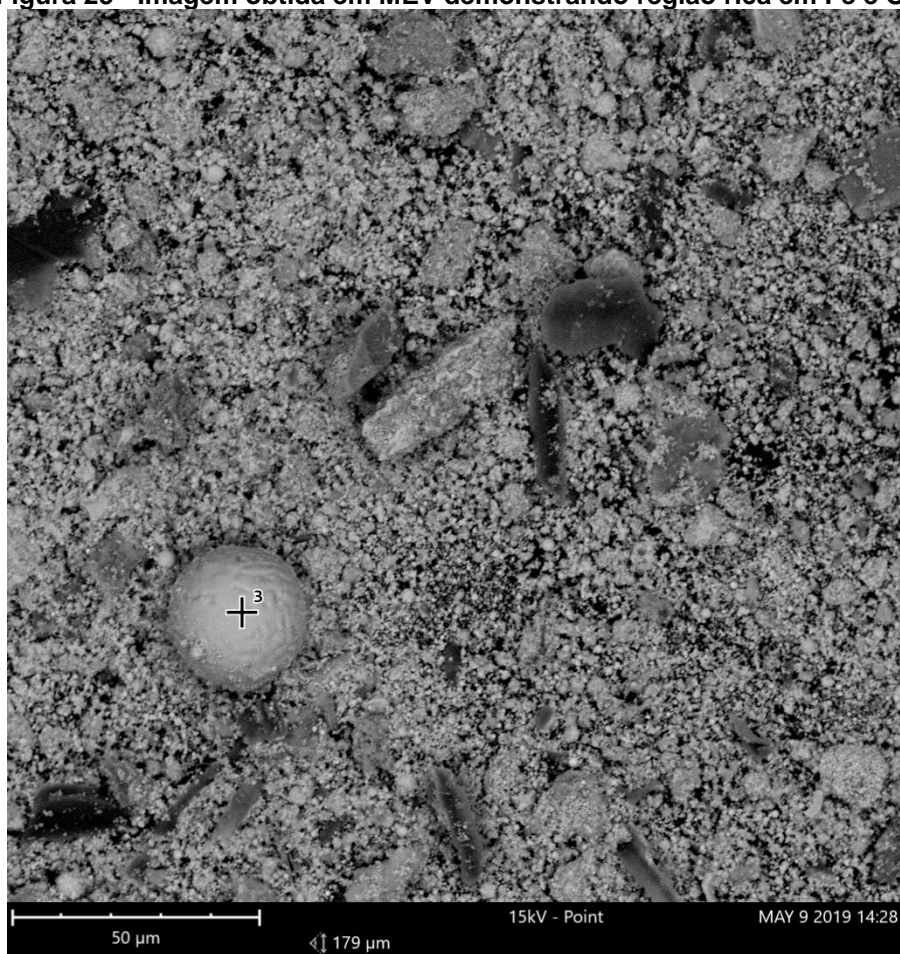
Fonte: O autor (2021).

Figura 24 - Espectro de EDS correspondente à partícula da lama fina de aciaria com formato irregular.



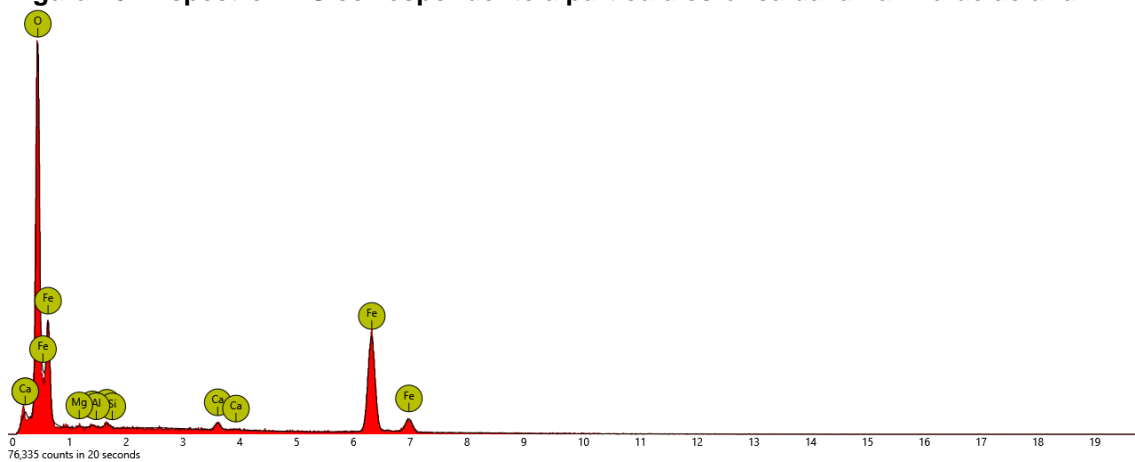
Fonte: O autor (2021).

Figura 25 - Imagem obtida em MEV demonstrando região rica em Fe e O.



Fonte: O autor (2021).

Figura 26 - Espectro EDS correspondente à partícula esférica da lama fina de aciaria.



Fonte: O autor (2021).

A análise pontual do EDS demonstrou diversas estruturas com grandes quantidades de oxigênio, o que demonstra a presença de óxidos distribuídos por toda a amostra. Tal fato é condizente com o observado por Machado *et al.* (2006).

5.3 Quantificação de elementos químicos

A Tabela 11 apresenta o resultado da análise via ICP da fração global do pó de aciaria.

A espectroscopia de emissão atômica tem seus resultados expostos na forma de óxidos estáveis. Entretanto, em conformidade com as análises de difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura, pressupõem-se que esta premissa não é verdadeira para todos os elementos identificados, como por exemplo o Fe o qual foi identificado em diferentes fases mineralógicas – hematita, magnetita, wustita e franklinita. Portanto, optou-se pela exposição em forma elementar para o ferro e zinco.

Tabela 11 - Composição Química

Elemento	%
Fe _{total}	49,33
Ca	9,17
Mg	1,94
Al	1,06
Mn	0,86
Zn	0,44
K, S, Ti, Pb, Na	0,94

Fonte: O autor (2021).

É possível observar que o somatório das concentrações não atingiu um valor de fechamento de 100%. Tal fato pode ser justificado pelos elementos como oxigênio e pela eficiência da metodologia aplicada para a solubilização da amostra, pois a mesma ocorreu de forma parcial. Em análises por via úmida, como é o caso do ICP, o passo inicial é realizar a digestão da amostra e preparar uma solução adequada para o direcionamento da análise. Conforme BREHM *et al.* (2001), o ataque ácido é a metodologia mais indicada para a dissolução de finos de aciaria. Contudo, o mesmo aborda a dificuldade em realizar a operação com total eficácia e atingir a digestão total. Portanto, indica-se a necessidade de análises complementares acerca do material residual para indicar quais elementos possam ter tido sua solubilização prejudicada.

É possível ainda ressaltar que a aplicação do ácido fluorídrico impede a quantificação da sílica na amostra. A fase SiO₂ interage com o ácido fluorídrico (HF) formando um

composto volátil (SiF_4), dessa forma pode-se inferir que grande parte desse percentual pode ser relacionado a esse fenômeno.

Conforme esperado, o elemento ferro é o componente majoritário. Além do Fe elementar, o mesmo possui contribuições de diversas associações como FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 e ZnFe_2O_4 . O valor total de Fe está 3 pontos percentuais acima da faixa apresentada por NYIRENDA (1991). O mesmo aponta uma faixa esperada para alguns elementos em lamas de aciaria baseado em plantas de forno elétrico a arco instaladas nos Estados Unidos.

Observa-se a grande presença (9,16 %) de Ca no material. O fato é justificado pela ampla utilização da calcita como fundente e no controle de basicidade da escória (APOCALYPSE, 2016). O valor se enquadra na expectativa apresentada por NYIRENDA (1991).

A quantidade de Zn presente (0,44%) é baixa com relação ao apresentado pelos demais autores citados até aqui, mas ainda assim é sensível para o uso deste material em alto forno. TAYLOR & ZUNKEL (1988) indicam que para o aproveitamento de um minério de ferro, a sua especificação deve possuir um teor abaixo de 0,01 % de zinco para não haver acúmulo e incrustações (cascão) no revestimento refratário do alto-forno. De acordo com ZHANG (2002), o fato de a presença de Zn ser abaixo de 15 % indica que sua forma se dá pelos espinélios ZnFe_2O_4 e ZnFe_3O_4 . O baixo teor pode ser justificado por uma possível baixa disponibilidade de sucata ferrosa galvanizada (APOCALYPSE, 2016).

Conforme as exposições de MENDES (2009), o uso de escorificantes e fundentes como óxidos (óxido de cálcio, magnésio, de silício) e os correspondentes carbonatos (dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), calcita (CaCO_3) e magnesita (MgCO_3) justificam a presença dos elementos Ca, Mg e Si. A presença do magnésio pode ainda se justificar pelo uso de dunito ($\text{Mg,Fe}_2\text{SiO}_4$) no controle de basicidade da escória.

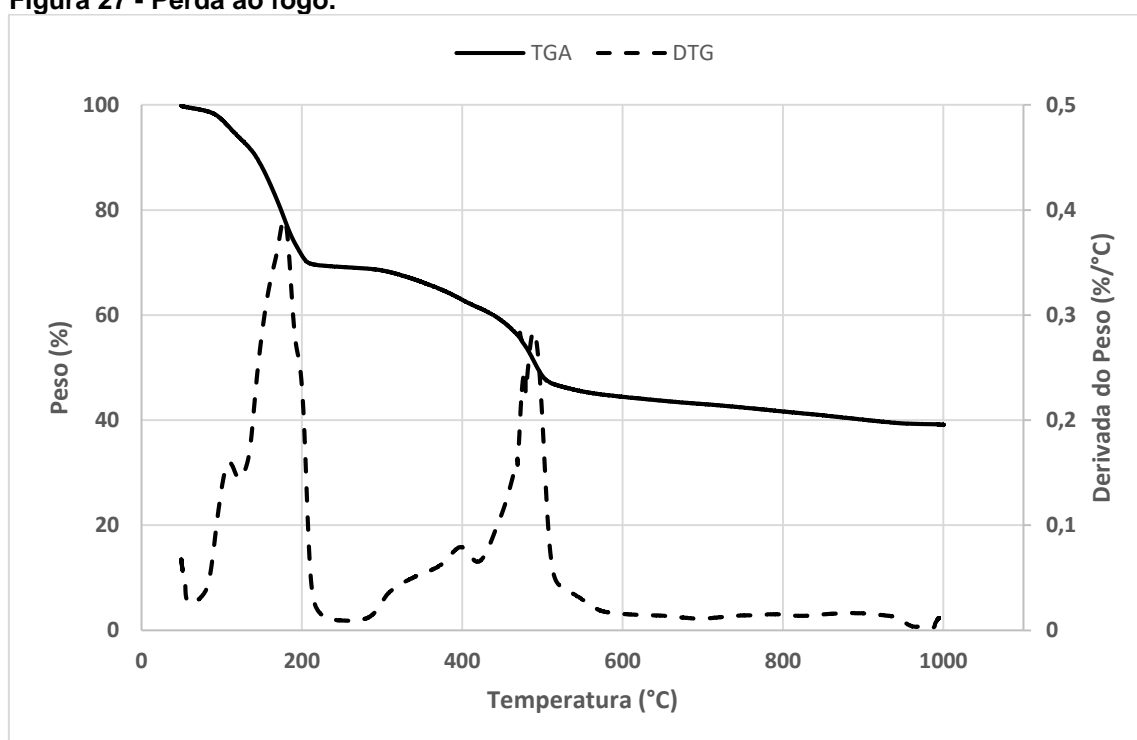
São utilizados como desoxidantes o alumínio e ferro ligas, tais como Fe-Si e Fe-Mn pela sua alta reatividade com oxigênio. Já com relação ao Mn se justifica pela utilização do próprio minério de manganês como agente refrigerante do banho

metálico, e também este elemento faz parte da composição do gusa. Quanto ao sódio e ao potássio (álcalis), fósforo e enxofre são impurezas oriundas da carga metálica utilizada como matéria prima (APOCALYPSE, 2016).

5.4 Análise Termogravimétrica

A perda ao fogo do material tal qual está expresso na Figura 27. Foi avaliado a expressiva perda total de 59,38 % da massa total em múltiplos estágios.

Figura 27 - Perda ao fogo.



Fonte: O autor (2021).

O primeiro estágio de perda mássica ocorre entre a temperatura ambiente e 100 °C, neste ponto muito provavelmente a perda se relaciona com a liberação de água. O segundo ponto entre 180 e 460 °C pode ser atribuído a algumas reações que possam ter ocorrido concomitantemente. Dentre as possibilidades, pode-se destacar uma decomposição que ocorre entre 180 e 260 °C atribuída a decomposição de hidróxidos de ferro como $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ou $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Outra possibilidade é inerente à desidroxilação do hidróxido de magnésio, ocorrendo entre 260 e 450 °C (MACHADO, 2005). Uma importante reação a ser levantada é a decomposição de carbono amorfo. O mesmo

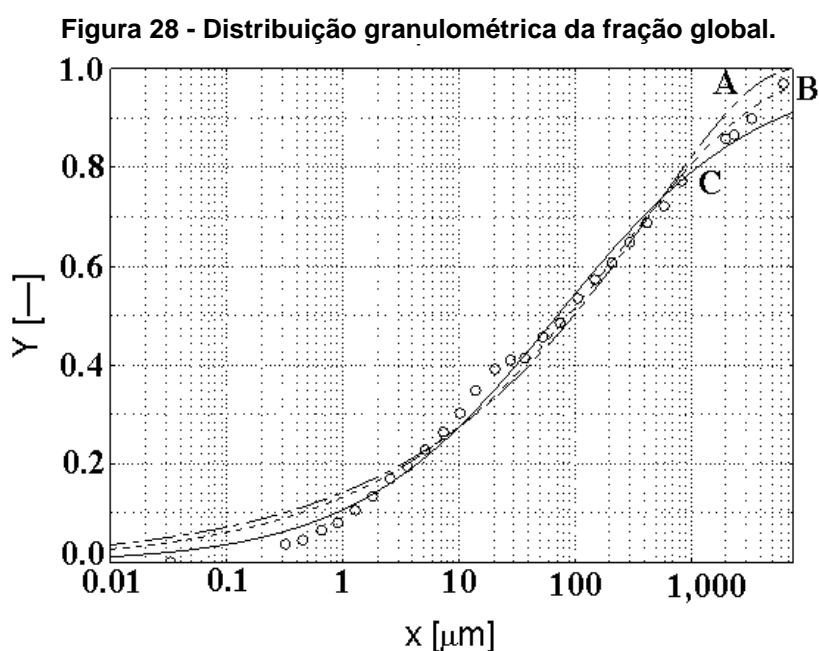
começa a se decompor termicamente a partir de 300 °C podendo se exaurir em 800 °C (FATHY *et al.*, 2015).

Outro ponto a ser ressaltado é a possibilidade de presença de matéria orgânica. MARTINS *et al.* (2008), relata um aumento na presença de matéria orgânica em amostras de pó de aciaria elétrica que sofreram intemperismo. Neste caso, ocorrem por pirólise a desidratação e desidroxilações de compostos que possam não ter sido identificados. Dentre estes compostos, são reportados na literatura hidróxido hidratado de bário (FRIEDRICH *et al.*, 2001) e hidróxido de cromo (III) (ABDURAKHMANOV, 2001).

Para a identificação exata das faixas das reações se faz necessário uma nova fase de análises com *gaps* menores de temperatura, pois a estrutura apresentada pelas curvas TGA/DTA demonstram a ausência de compostos estáveis com diferentes etapas, ocorrendo sobreposição de processos.

5.5 Características Físicas

A análise da distribuição granulométrica da lama fina de aciaria é mostrada na Figura 28.



Fonte: O autor (2021).

As análises de regressão foram realizadas conforme as Equações 1, 2 e 3. A Tabela 12 resume os parâmetros de aderência em relação a nuvem de pontos experimentais para as três distribuições. A equação de Hill obteve a melhor aderência.

Tabela 12 - Análise de regressão para a distribuição de partículas.

Distribuição	Erro padrão	Coefficiente de determinação (R ²)	Parâmetros de regressão
Rosin-Rammler	0,0302	0,98945	$x_{50} = 87.99 \mu\text{m}$; $n = 0.3540$
Harris	0,0405	0,980958	$x_{\text{max}} = 9,000.0 \mu\text{m}$; $a = 0.3056$; $b = 2.3979$
Hill	0,0249	0,99284	$x_{50} = 70.54 \mu\text{m}$; $k = 0.4986$

Fonte: Autor (2021).

Verifica-se a grande variabilidade de tamanhos existente na lama fina de aciaria. TAKANO *et al.* (1999), realizando análise de tamanhos em duas amostras diferentes de lamas de aciaria, identificaram que quase 90 % das partículas eram inferiores à 10 μm . Em conformidade, XIA & PICKLES (2000), apontaram que as lamas de aciaria possuem forte tendência em formar agregados à medida que a granulometria diminui, indicando que, a maioria das partículas em forma individual não será maior do que 1 μm . Tal fenômeno pode justificar a perda da aderência ao modelo nas frações abaixo de 50 μm .

O reflexo da diminuta granulometria está expresso nas características superficiais (

Tabela 13). A análise evidenciou que a capacidade da monocamada foi de $4,3091 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ e a constante BET 98,96. A área superficial foi inferior aos resultados obtidos em lamas oriundas de processos semelhantes por PAULA (2013), WU (1999) e METZ (2016).

Tabela 13 - Área superficial BET.

Autores Característica	Paulo (2021)	Paula (2013)	WU (1999)	Metz (2016)
	Área superficial BET (m^2/g)	0,66	6,6	14,65

Fonte: O autor (2021).

A área superficial pode ter sido impactada pela volatilização do zinco por redução da lama de aciaria em altas temperaturas. De acordo com diversos autores, o Zn no pó de aciaria elétrica se dá nas formas de ZnO e franklinita. A mesma a partir de 800 °C perde sua estabilidade e favorece a volatilização do Zn, o que acarreta na modificação da microestrutura da fase cristalina, gerando uma vacância na estrutura cristalina e por consequência a formação de poros. Tal fato ainda pode corroborar com a ausência da formação de ZnO no difratograma de raios X bastante recorrente em materiais da mesma natureza (PAULA, 2013; TSUGITA, 2003).

Com base nos resultados obtidos, verifica-se uma ampla distribuição de tamanhos no material que impactou no d_{50} observado. Mediante a isso, foi realizado a classificação do material em meio fluido através de classificador do tipo helicoidal. O intuito foi dividir o material em duas frações com faixa granulométrica de menor amplitude, promovendo assim, um comportamento hidrodinâmico mais favorável a concentração a posteriori.

De acordo com a partição mássica obtida, a fração majoritária se comportou como *overflow*, representando 76,7 % da alimentação.

A descrição granulométrica para o *underflow* (d_{50} com valor de 349,54 μm) e *overflow* (d_{50} com valor de 56,96 μm) estão expressos na Tabela 14 e Tabela 15 respectivamente. É válido ressaltar que para o *underflow* a porção acima de 500 μm foi discriminada com mais peneiras a fim de evitar a retenção superior à 5 % na primeira, mas para análise comparativa entre as duas porções, as tabelas foram representadas com os tamanhos semelhantes.

Tabela 14 - Análise granulométrica *underflow* do classificador helicoidal.

Tamanho de Partícula (μm)	Retido Simples (%)	Retido Acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
500	38,9	38,9	61,1
295	12,6	51,5	48,5
208	12,0	63,4	36,6
147	9,2	72,7	27,3
104	5,5	78,2	21,8
37	12,0	90,2	9,8
-37	9,8	100	0

Fonte: O autor (2021).

Tabela 15 - Análise granulométrica *overflow* do classificador helicoidal.

Tamanho de Partícula (μm)	Retido Simples (%)	Retido Acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
500	1,1	1,1	98,9
295	0,9	2,0	98,0
208	2,0	4,0	96,0
147	2,6	6,6	93,4
104	2,4	9,0	91,0
74	4,0	13,0	87,0
37	8,8	21,8	78,2
-37	78,2	100	0,0

Fonte: O autor (2021).

A massa específica foi avaliada para a fração global e para as amostras de *underflow* e *overflow*. Os resultados estão expressos na Tabela 16. O valor de massa específica é próximo aos 3,01 verificados por NOLASCO-SOBRINHO *et al.* (2003) em seu trabalho acerca da análise de uma amostra de pó de aciaria elétrica.

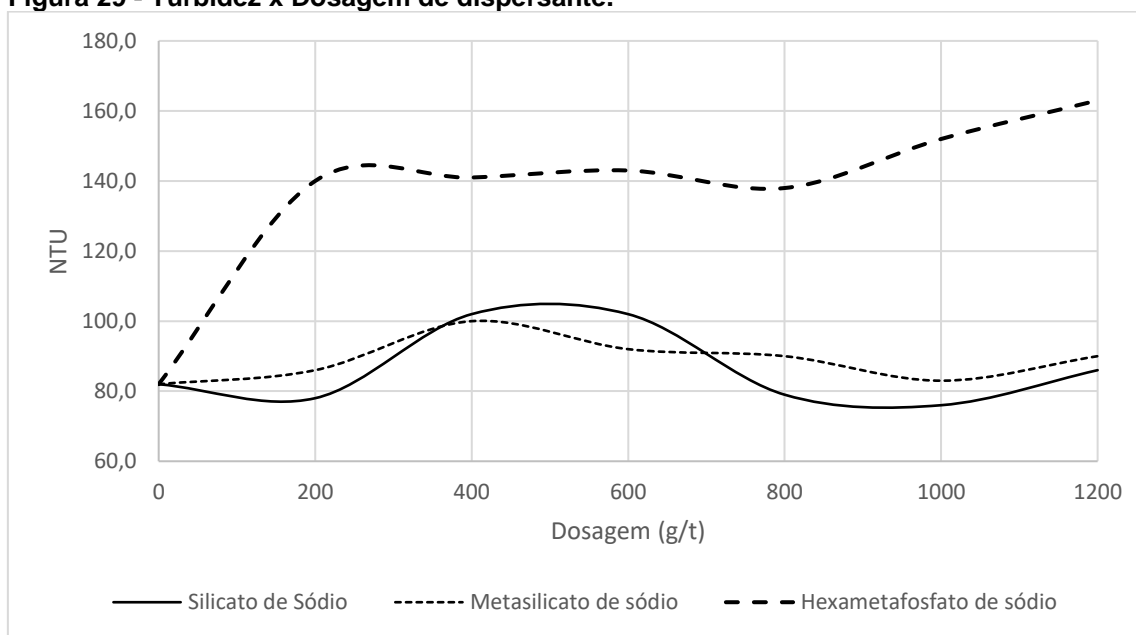
Tabela 16 - Massa específica por tipo de amostra.

Amostra	Massa específica (kg/m^3)
Global	2990
<i>Underflow</i>	3950
<i>Overflow</i>	3570

Fonte: O autor (2021).

5.6 Avaliação de dispersantes para polpa

Os ensaios de turbidez foram utilizados como parâmetro para observar a estabilidade termodinâmica da suspensão. A desempenho dos reagentes utilizados como potenciais agentes dispersantes em pH natural de polpa estão expostos na Figura 29.

Figura 29 - Turbidez x Dosagem de dispersante.

Fonte: O autor (2021).

De acordo com o exposto, nota-se que o hexametáfosfato de sódio levou a melhores resultados em relação aos demais compostos analisados. É notado ainda que não houve grande influência da concentração do reagente na estabilidade da suspensão na faixa de 200 a 800 g/t, sendo o efeito dispersante foi mais pronunciado quando aplicado 1200 g/t. MANNA *et al.* (2011) apontam a alta desempenho do hexametáfosfato de sódio ao aplicar o mesmo como agente dispersante em sistema composto por óxidos de ferro, alumina e quartzo. LU *et al.* (2015) descrevem que a magnetita possui potencial negativo em valores de pH extremamente ácidos à alcalinos na presença de hexametáfosfato de sódio. Fenômeno parecido ocorre com a hematita indicado por MA (2012). Com relação à calcita, NI & LIU (2013), discorrem sobre a possibilidade de que a adsorção ocorra quimicamente promovendo uma carga superficial fortemente negativa indiferente ao pH no mineral. LIANG *et al.* (2018), demonstraram que na faixa de pH alcalina (adotada durante o ensaio), não existe heterocoagulação entre partículas de quartzo e grafita na presença de hexametáfosfato de sódio, cujo fenômeno é devido a repulsão entre as duplas camadas elétricas (carga negativa). Portanto, pressupõe-se que a adição do hexametáfosfato de sódio implica em adsorção de espécies aniônicas nas partículas, impondo carga superficial negativa nas fases cristalinas em questão, o que promove

repulsão eletroestática. A individualização implica em um retardo no tempo de sedimentação das partículas, aumentando a turbidez da suspensão.

Com relação ao silicato de sódio e o metassilicato de sódio, não houveram grandes variações na turbidez com o aumento de suas respectivas concentrações. O silicato de sódio é usado como dispersante na floculação seletiva de minérios de ferro com o auxílio do amido como polímero floculante. A função do mesmo é a remoção de íons coagulantes como os de cálcio e magnésio através da precipitação. AROL & IWASAKI (2003) alertam que sua efetividade é relacionada diretamente com a concentração desses cátions em solução e quantidade empregada do reagente. Em seu trabalho foi observado que altas dosagens (necessárias para precipitação de grandes quantidades dos cátions Ca^{2+} por exemplo) podem acarretar no recobrimento de partículas de hematita por íons de silicato. A presença de Ca^{2+} e Mg^{2+} podem ter sido impulsionados pelas espécies detectadas na caracterização mineralógica e análise química, inibindo assim a ação do dispersante em questão.

A Figura 30 traz a relação entre a turbidez da suspensão em função da variação do pH da polpa. Nota-se que o nível de sólidos em suspensão cresce em função do aumento do pH de polpa. No intervalo de análise a hematita (ALEXANDRINO *et al.*, 2016), magnetita (SUN *et al.*, 1998), quartzo (ABAKA-WOOD *et al.*, 2017), calcita (MAHROUQI *et al.*, 2017), a grafita (SINGH *et al.*, 2006), possuem potencial negativo, assim é esperado que as partículas sofram repulsão entre si e por consequência impulsionem a quantidade de sólidos em suspensão. Os resultados apresentados são positivos em relação ao aumento de sólidos em suspensão, mas com níveis mais baixos em relação ao ensaio realizado com acréscimo de agentes dispersantes como o hexametáfosfato de sódio.

Figura 30 - Turbidez x pH de polpa.

Fonte: O autor (2021).

5.7 Separação Densitária

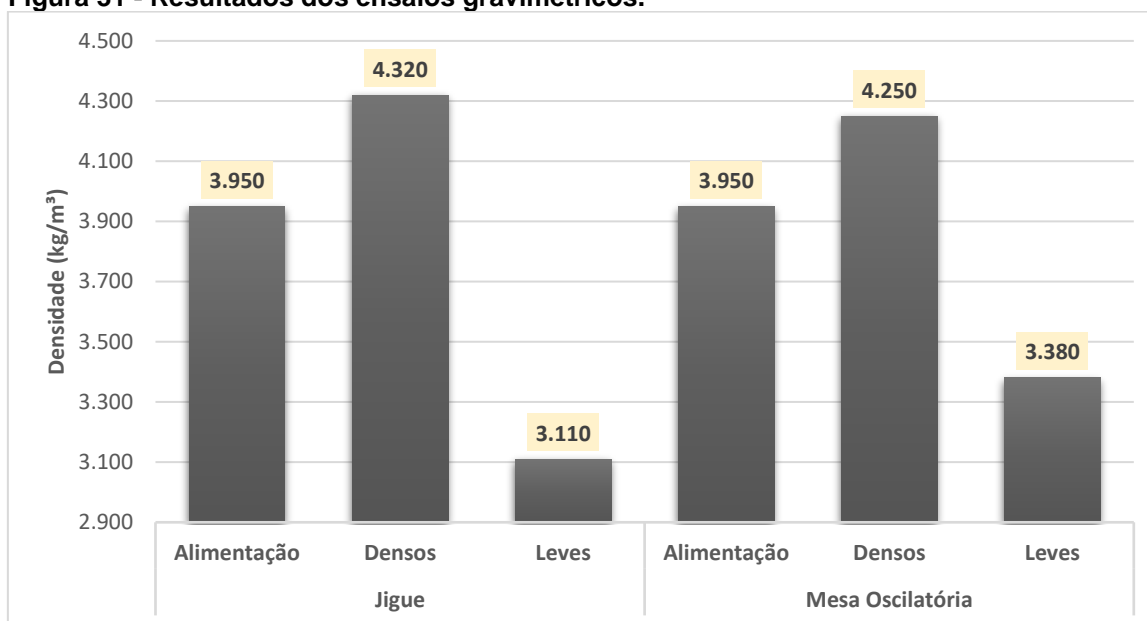
Os resultados para os ensaios de separação densitária com o *underflow* da etapa de classificação estão expostos na Tabela 17 e Figura 31. Como parâmetro para avaliar a desempenho de concentração foi utilizada a relação de enriquecimento da massa específica da alíquota de concentrado. O aumento na massa específica indica um aumento na presença das fases portadoras do elemento ferro.

Tabela 17 - Resultados dos ensaios gravimétricos.

	Massa específica da alimentação (kg/m ³)	Massa específica Concentrado (kg/m ³)	Massa específica Rejeito (kg/m ³)	Relação enriquecimento da Massa específica (-)
Mesa Oscilatória	3950	4250	3110	1,07
Jigue	3950	4320	3380	1,09

Fonte: O autor (2021).

Figura 31 - Resultados dos ensaios gravimétricos.

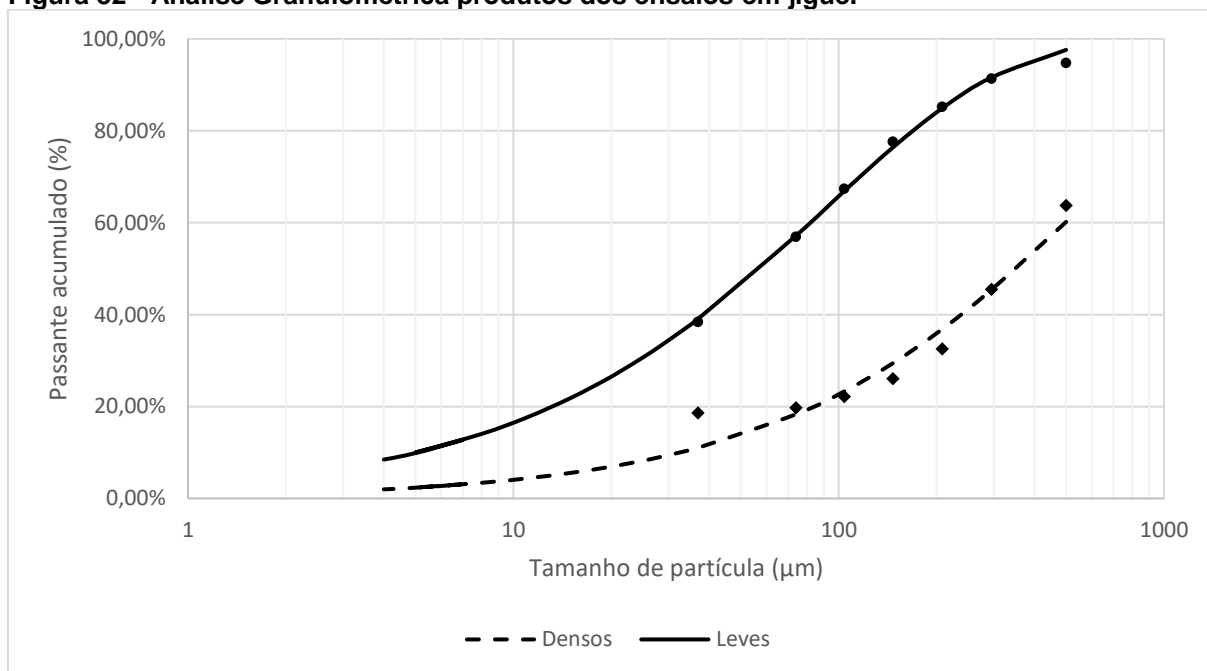


Fonte: O autor (2021).

Ainda que os resultados tenham sido próximos, a operação em jigue convencional demonstrou resultados superiores às condições analisadas na mesa oscilatória, com concentrado mais puro e rejeito mais limpo (Figura 31). Ainda assim, os rejeitos com massas específicas elevadas, em função dos valores superiores aos constados para as fases cristalinas puras apontadas como ganga – calcita e quartzo –, indicam a necessidade de uma concentração em múltiplos estágios, independentemente do equipamento adotado.

Embora as técnicas analisadas tenham tido o intuito de verificar a aplicabilidade das mesmas na etapa de desbaste (*rougher*), a qual o nível de pureza dos concentrados não são os mais elevados, de acordo com o grau de enriquecimento observado, a massa específica das fases cristalinas presentes na amostra não foi a propriedade diferenciadora com maior influência na operação. Conforme a exposição de DAS & SARKAR (2018), a sedimentação de partículas também é fortemente influenciada pela sua granulometria. Através das curvas de distribuição de tamanhos da Figura 32 e do aspecto visual (Figura 33) dos produtos obtidos pela operação no jigue, é possível observar que houve segregação, indicando que a concentração se deu com contribuição principal da granulometria.

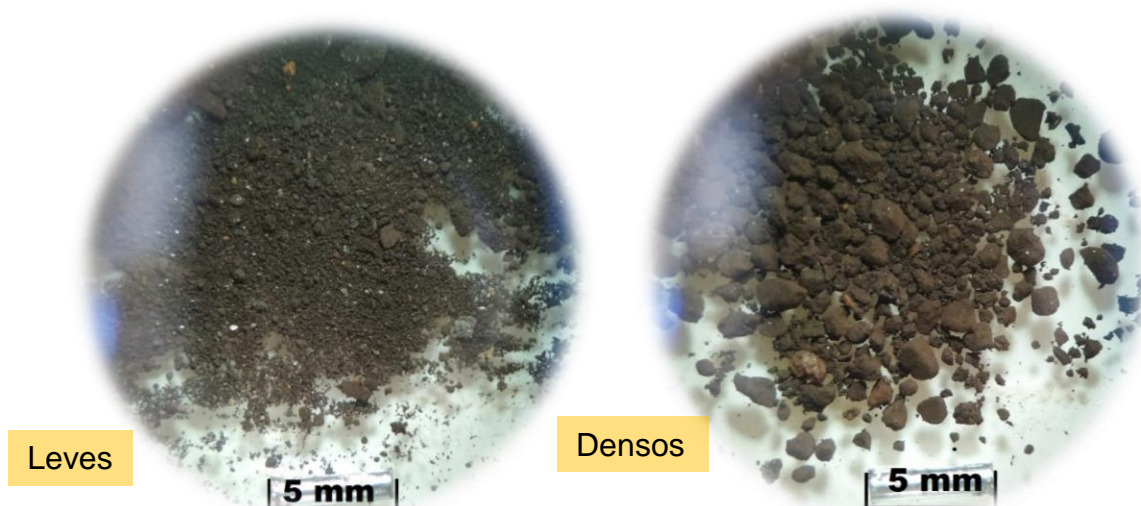
Figura 32 - Análise Granulométrica produtos dos ensaios em jigue.



Fonte: O autor (2021).

A resposta observada pode ser em função de um baixo tempo de residência que os equipamentos forneceram, pois, partículas finas necessitam de um longo período em suspensão, devido a sua baixíssima cinética de sedimentação, portanto acabam sendo direcionadas ao produto leve.

Figura 33 - Produtos da concentração em jigue.



Fonte: O autor (2021).

Como já citado anteriormente, as frações mais finas das lamas de aciaria possuem uma forte tendência em recobrir as partículas mais grossas e também na formação de agregados. É recomendado que o material esteja bem bitolado, ou seja, com uma distribuição de tamanhos de partículas estreita, pois, diferentes tamanhos de partículas possuem diferentes mecanismos atuantes no processo de concentração gravítica. SAMPAIO & TAVARES (2005) apontam que à medida que a granulometria da alimentação reduz, são necessários movimentos mais frequentes e com menor amplitude, ao contrário do que ocorre à medida que este tamanho aumenta, fazendo-se necessário movimentos menos frequentes e mais alongados.

5.8 Ensaios de separação magnética

Na Tabela 18, é possível observar os resultados obtidos utilizando o separador magnético de baixo campo do tipo tambor. Como parâmetro para avaliar a desempenho de concentração foi utilizada a relação de enriquecimento da massa específica aparente da alíquota de concentrado. O aumento na massa específica indica um aumento na presença das fases portadoras do elemento ferro. As variáveis analisadas foram a intensidade de campo e a granulometria da alimentação. As medidas de massa específica possuem um desvio de $\pm 100 \text{ kg/m}^3$.

Tabela 18 - Resultados obtidos através do separador magnético tipo tambor (*rougher*).

Ensaio	Campo Magnético (T)	Material Classificado	Recuperação Mássica (%)	Massa específica do Concentrado (kg/m^3)	Enriquecimento da massa específica (-)
1	0,050	Sim	29,59	4620	1,17
2	0,075	Sim	42,32	4530	1,15
3	0,050	Não	36,19	4090	1,37
4	0,075	Não	52,05	4010	1,34

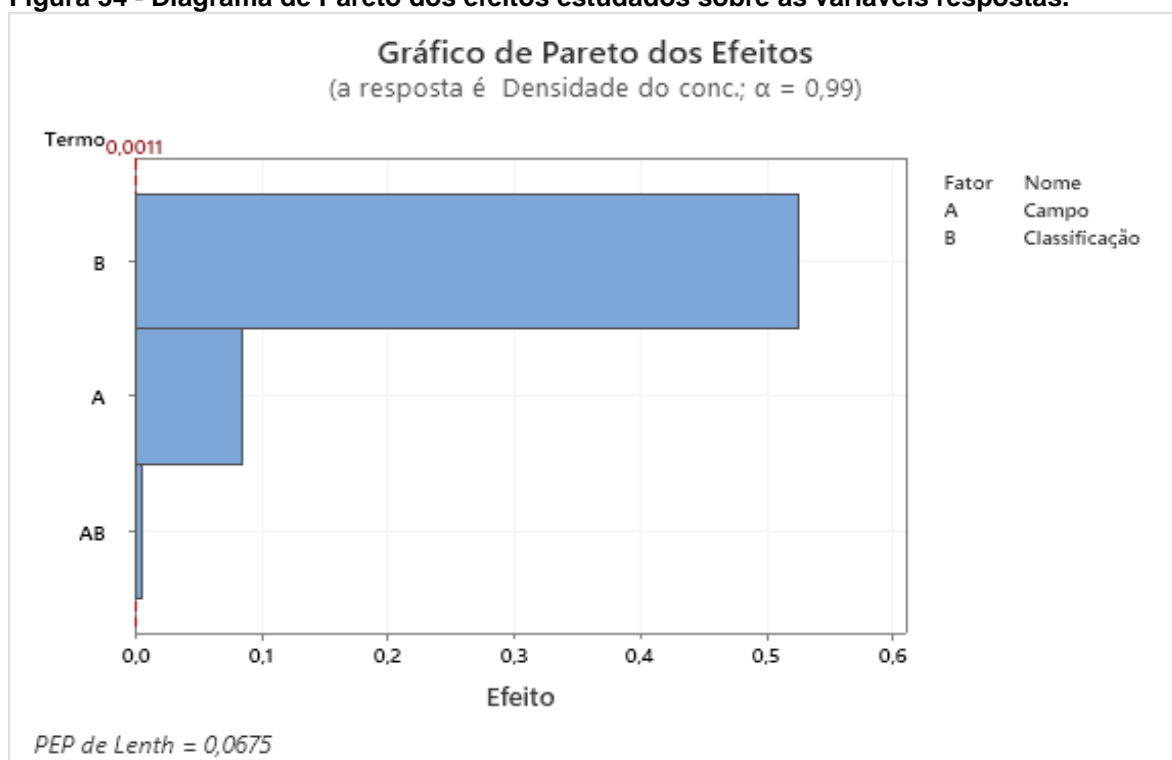
Fonte: O autor (2021).

A condição que promoveu concentrado com maior valor de massa específica foi o alimentado com a granulometria mais grossa e com intensidade de campo de 0,050 T. Para a fração classificada percebe-se o aumento na recuperação em massa por aproximadamente 12 pontos percentuais, com o aumento da intensidade do campo magnético aplicado. Conforme a expectativa inerente a relação teor/recuperação em massa, o acréscimo é acompanhado com o declínio na qualidade do concentrado

obtido, constatado através da queda no valor da massa específica. O mesmo fenômeno foi observado nos ensaios na ausência de etapa de classificação com o aumento de aproximadamente 16 pontos percentuais. As maiores relações de enriquecimento foram observadas para os ensaios realizados com a amostra tal qual.

O gráfico apresentado na Figura 34, indica a relevância de cada uma das variáveis de forma isolada e conjunto. De acordo com a análise estatística pode-se apontar que o fator que teve maior influência na massa específica do concentrado foi a granulometria da alimentação. Resultado semelhante aos relatados por MA & HOUSER (2014) que realizaram ensaios de separação magnética de baixo campo (separador do tipo tambor), combinados com etapa de classificação por peneiras, em diferentes amostras de resíduos de aciaria e relataram a redução do teor de ferro do concentrado à medida que *top size* da alimentação fosse reduzido. Os resultados também são corroborados pelo trabalho de MENAD *et al.* (2014). O mesmo indica que a técnica trabalha melhor com partículas grossas liberadas de Fe e sofrem redução de desempenho ao trabalhar com partículas menores que 200 μm devido ao recobrimento das fases de interesse, inibindo a separação magnética.

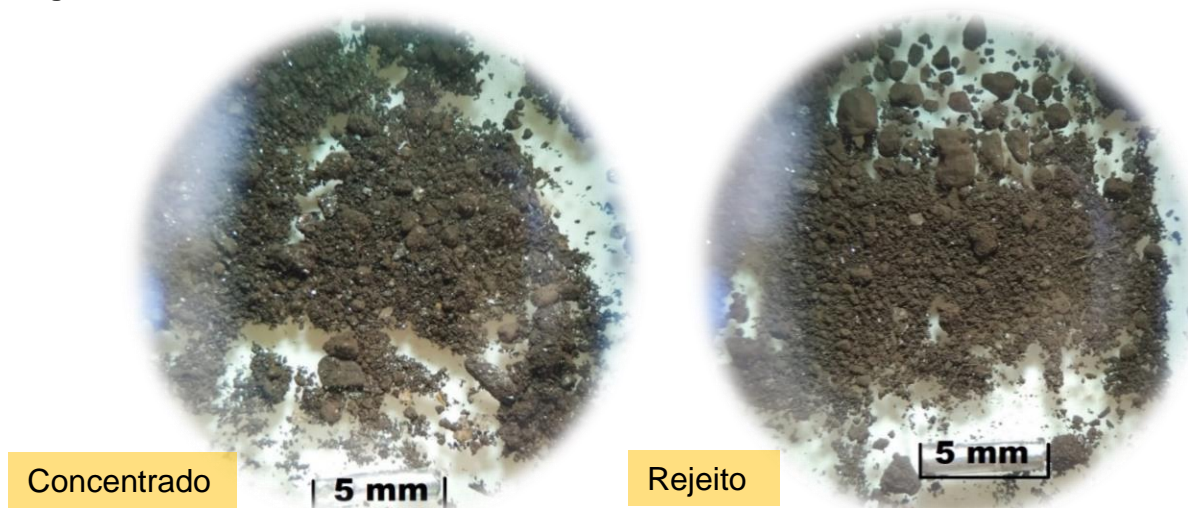
Figura 34 - Diagrama de Pareto dos efeitos estudados sobre as variáveis respostas.



Fonte: O autor (2021).

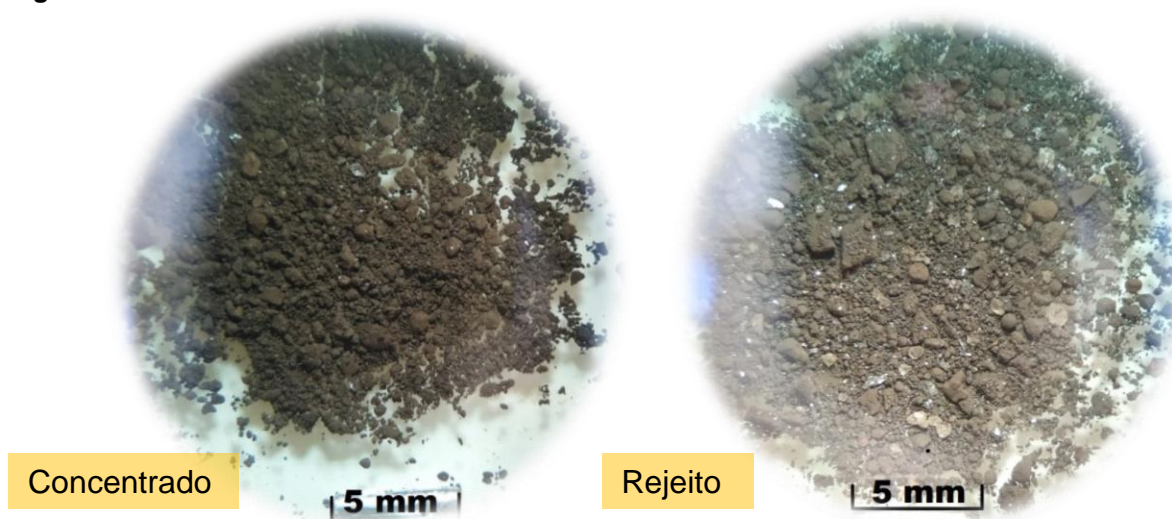
As Figuras Figura 35 e Figura 36 possuem os concentrados à esquerda e rejeitos à direita, gerados nos ensaios 1 e 4, respectivamente.

Figura 35 - Produtos ensaio 01.



Fonte: O autor (2021).

Figura 36 - Produtos ensaio 04.



Fonte: O autor (2021).

Um fator importante avaliado nos ensaios foram as perdas de material na forma de lamas. A granulometria mais grossa e aplicação de campos magnéticos mais altos, implicaram na minimização da perda embora ainda sejam constatados valores bastantes expressivos. É possível ainda notar a perda de fases cristalinas ferrosas por este mecanismo, devido à massa específica real expostas na Tabela 19.

Tabela 19 - Perdas mássicas em formas de lamaz.

Ensaio	Campo Magnético (T)	Material Classificado	Perda Mássica (%)	Massa específica das lamaz (kg/m ³)
1	0,050	Sim	13,30	4170
2	0,075	Sim	9,07	4110
3	0,050	Não	15,46	3780
4	0,075	Não	14,47	3880

Fonte: O autor (2021).

Os resultados para os ensaios de concentração de separação magnética no separador *Carpco Wet Low-Intensity Magnetic Separator Model 3X4L* estão expressos na

Tabela 20. As medidas de massa específica possuem um desvio de ± 100 kg/m³.

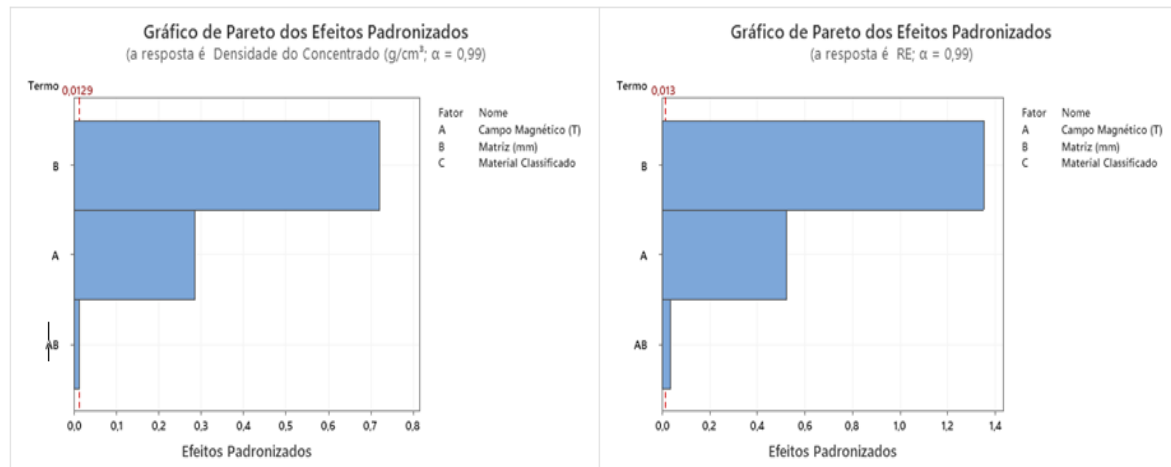
Tabela 20 - Resultados separação magnética scavenger.

Ensaio	Campo Magnético (T)	Matriz (mm)	Material Classificado	Recuperação Mássica (%)	Massa específica do Concentrado (kg/m ³)	Enriquecimento da massa específica (-)
1	0,100	35,0	Sim	73	3950	1,06
2	0,075	35,0	Sim	87	4460	1,20
3	0,050	35,0	Sim	57	4000	1,08
4	0,100	35,0	Não	82	4190	1,27
5	0,075	35,0	Não	73	4100	1,25
6	0,050	35,0	Não	68	4110	1,25
7	0,100	27,5	Sim	92	3820	1,03
8	0,075	27,5	Sim	88	4220	1,13
9	0,050	27,5	Sim	85	4290	1,15
10	0,100	27,5	Não	92	3580	1,09
11	0,075	27,5	Não	87	3570	1,09
12	0,050	27,5	Não	84	3540	1,08
13	0,100	20,0	Sim	93	4470	1,20
14	0,075	20,0	Sim	92	4340	1,17
15	0,050	20,0	Sim	89	4360	1,17
16	0,100	20,0	Não	87	3470	1,05
17	0,075	20,0	Não	87	3810	1,16
18	0,050	20,0	Não	84	3590	1,09

Fonte: O autor (2021).

Fenômeno semelhante ao ocorrido na etapa *rougher* foi observado, onde a granulometria da alimentação se demonstrou como fator preponderante para obtenção de concentrados com valores de massas específicas superiores. Já com relação à intensidade de campo magnéticos aplicados, não se observou grande relevância. O gráfico de Pareto dos fatores estudados (matriz, intensidade de campo magnético) sobre as variáveis analisadas (massa específica do concentrado e enriquecimento da massa específica) estão apresentados na Figura 37. Nota-se que o tamanho de matriz adotado no ensaio foi o fator de maior impacto no valor da massa específica. As ponderações constatadas foram de encontro ao obtido por ROCHA (2018), que realizou a concentração de rejeitos finos de minério de ferro. Em sua pesquisa é relatada a baixa influência da variação da intensidade do campo magnético ao manter *gap* de passagem dos minerais constante em separador magnético do tipo carrossel.

Figura 37 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para separador magnético de alta intensidade.

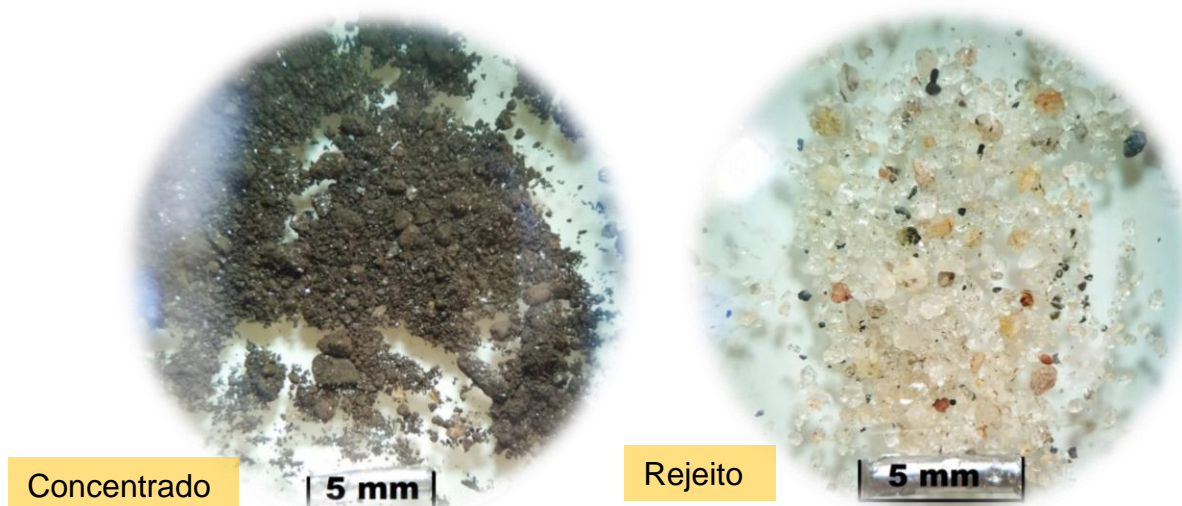


Fonte: O autor (2021).

A classificação do material se mostrou efetiva pois, através das imagens apresentadas nas Figura 38 e Figura 39, pode-se observar que a perda de fases cristalinas portadoras de ferro (cores escuras) foi minimizada com a operação de classificação. O escoamento de fases ferrosas tende a ser maior para alimentação com partículas mais finas. As perdas excessivas podem ser devido ao faixa de operação do equipamento com relação a granulometria do material alimentado. Além disto, ao

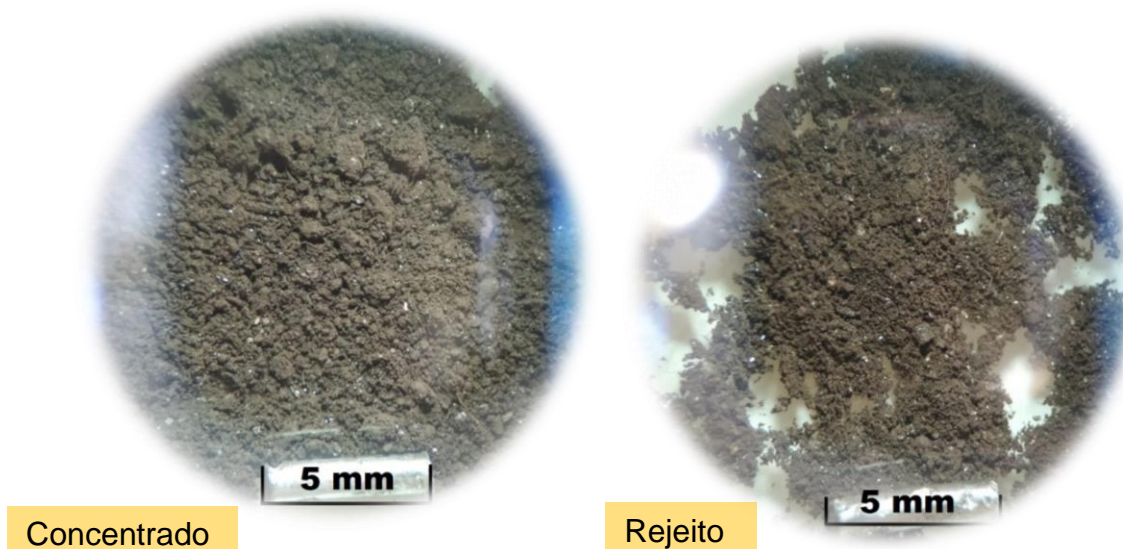
alimentar partículas menores que $100\ \mu\text{m}$ (o d_{50} analisado para a amostra global foi de $44\ \mu\text{m}$) as forças eletrostática e van der Waals ganham bastante importância e as partículas passam a formar agregados durante a separação magnética, diminuindo a liberação das mesmas. Os presentes resultados corroboram com os obtidos por MA & HOUSER (2014) que indicaram que a faixa para a concentração de lamas finas seria entre 0,02 e 0,08 T. Fases ferromagnéticas como a hematita e a wustita são recuperadas com campos mais baixos e à medida que o campo é elevado, partículas paramagnéticas como a ferrita de zinco e partículas não liberadas são removidas (MENAD *et al.*, 2014).

Figura 38 - Produtos ensaio 08.



Fonte: O autor (2021).

Figura 39 - Produtos ensaio 15.

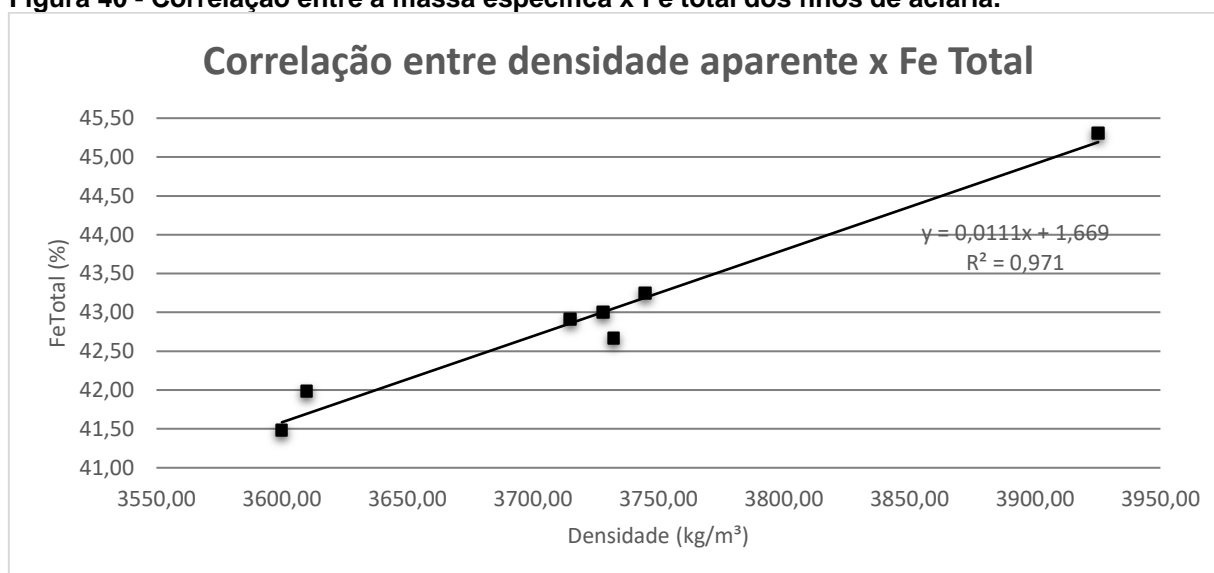


Fonte: O autor (2021).

5.9 Ensaio de Flotação

Com o intuito de avaliar o desempenho dos ensaios de flotação em bancada, verificou-se a correlação entre a massa específica real e a quantificação de Fe total de alíquotas aleatórias dos finos de aciaria (Figura 40), usufruindo do método exposto pela NBR ISO 9507 (usualmente adotado para minérios de ferro). Embora o banco de dados apresente uma pequena quantidade de amostras, na impossibilidade de utilizar métodos de quantificação químicos mais robustos, verifica-se correlação suficiente (0,971) para quantificar o teor de ferro dos produtos dos ensaios propostos.

Figura 40 - Correlação entre a massa específica x Fe total dos finos de aciaria.



Fonte: O autor (2021).

O teor de ferro da alimentação (Tabela 21) e dos concentrados dos ensaios foram determinados conforme esta metodologia proposta.

Tabela 21 - Características físico-químicas da alimentação dos ensaios de flotação.

Massa específica da alimentação (kg/m³)	Teor de Ferro (%)
3576,3	41,32

Fonte: O autor (2021).

Foram realizados ensaios utilizando o oleato de sódio como coletor e sem a presença de nenhum agente depressor. Os resultados estão expressos na Tabela 22.

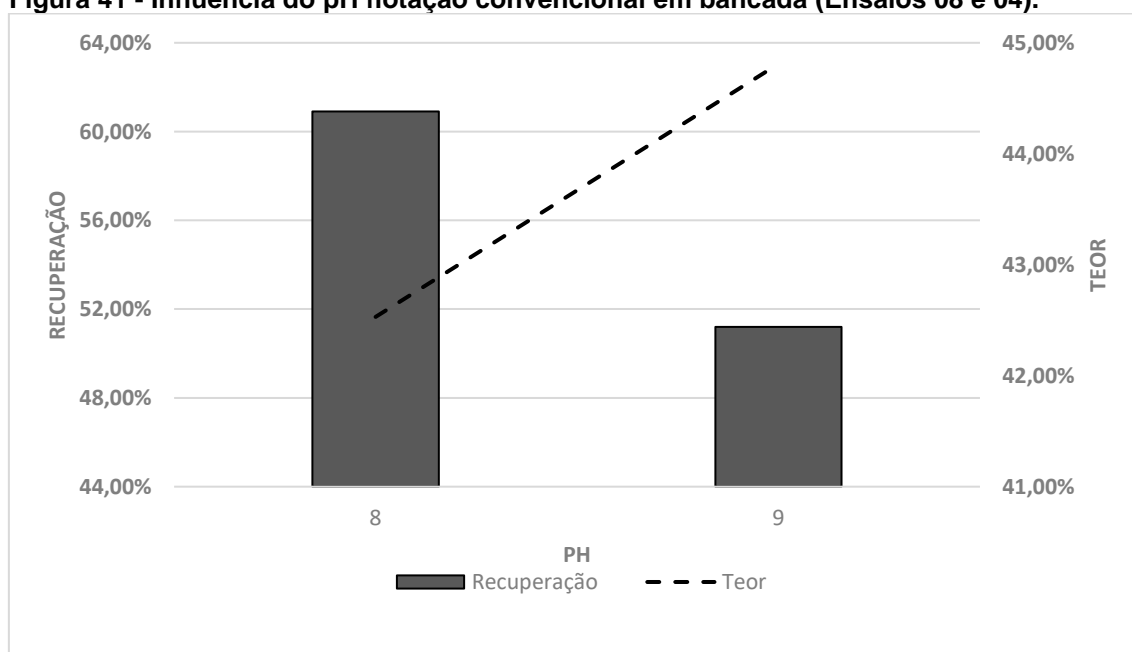
Tabela 22 - Resultados ensaios flotação convencional utilizando oleato de sódio como coletor.

Ensaio	pH	Dosagem Coletor (g/t)	% de sólidos (%)	Recuperação Mássica (%)	Enriquecimento	Teor de ferro do concentrado (%)
1	9	900	30	70,8	1,05	43,20
2	9	1200	30	74,5	1,04	42,80
3	9	900	15	45,6	1,09	45,00
4	9	1200	15	51,2	1,08	44,80
5	8	900	15	54,4	1,01	41,86
6	8	1200	15	60,9	1,03	42,53

Fonte: O autor (2021).

A análise dos resultados permite identificar uma queda na recuperação com o aumento do pH de flotação (Figura 41). Essa queda vai de encontro ao aumento do teor do concentrado obtido em pH 9.

Figura 41 - Influência do pH flotação convencional em bancada (Ensaio 08 e 04).



Fonte: O autor (2021).

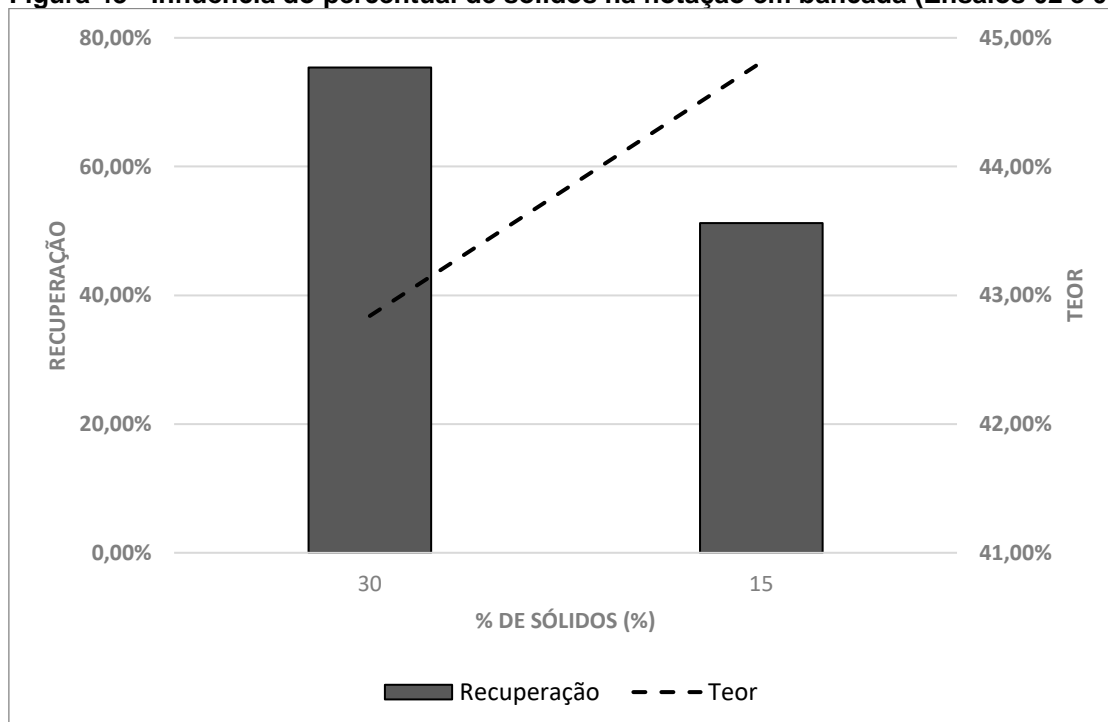
Conforme já bastante difundido na literatura o aumento na concentração do coletor indicou um aumento na recuperação, em associação apresentou ligeira queda no teor do concentrado (Figura 42). O mesmo é observado para a variável percentual de sólidos na polpa (Figura 43).

Figura 42 - Influência da dosagem do coletor na flotação em bancada (Ensaio 03 e 04).



Fonte: O autor (2021).

Figura 43 - Influência do percentual de sólidos na flotação em bancada (Ensaio 02 e 04).



Fonte: O autor (2021).

Os ensaios de flotação reversa em bancada realizados com o *overflow* da etapa de classificação, utilizando oleato de sódio como coletor e o pirofosfato de sódio como depressor, estão expressos na Tabela 23.

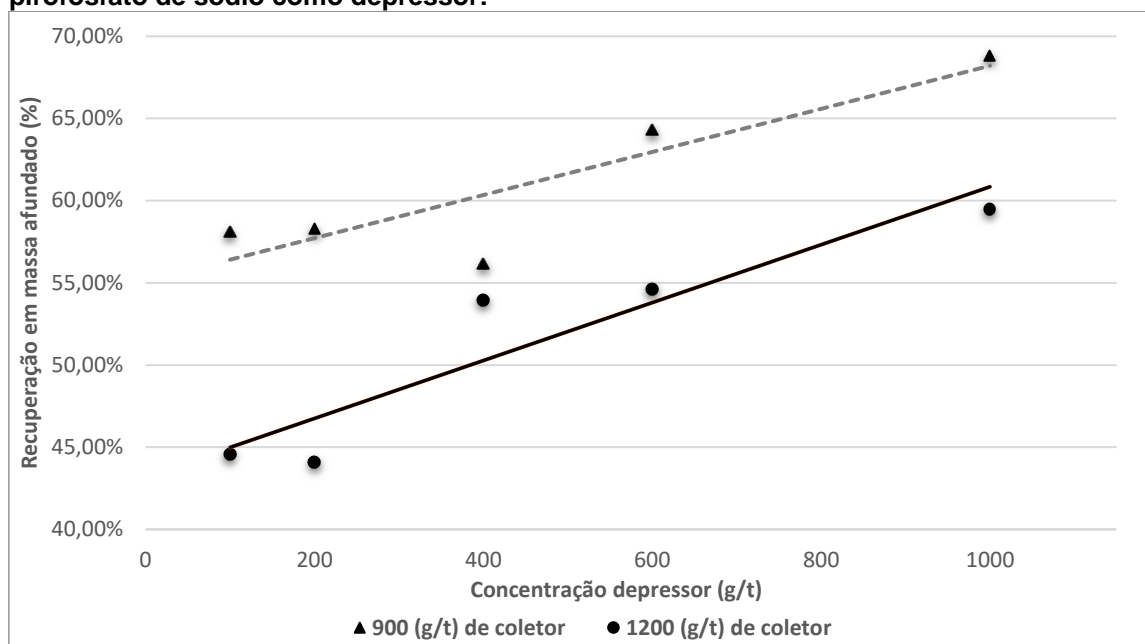
Tabela 23 - Resultados de flotação de bancada utilizando depressor pirofosfato de sódio.

Ensaio	pH	Dosagem Coletor (g/t)	Dosagem do depressor (g/t)	% de sólidos (%)	Recuperação (%)	Enriquecimento	Teor de ferro do concentrado (%)
1	9	900	100	15	58,1	1,037	42,86
2	9	900	200	15	58,3	1,013	41,85
3	9	900	600	15	64,3	1,009	41,70
4	9	900	1000	15	68,8	1,006	41,59
5	9	900	400	15	56,1	1,009	43,14
6	9	1200	200	15	44,1	1,041	43,03
7	9	1200	400	15	53,9	1,041	43,03
8	9	1200	600	15	54,61	1,013	41,88
9	9	1200	1000	15	59,47	1,012	41,81
10	9	1200	100	15	44,56	1,004	41,48

Fonte: O autor (2021).

Pela Figura 44, é possível verificar que à medida que a concentração de depressor aumenta, é verificada uma tendência de crescimento da recuperação em massa no material afundado, indicando que o pirofosfato de sódio possui um papel depressor no sistema. Simultaneamente percebe-se que o acréscimo na dosagem do coletor indica um decréscimo na fração mássica afundada.

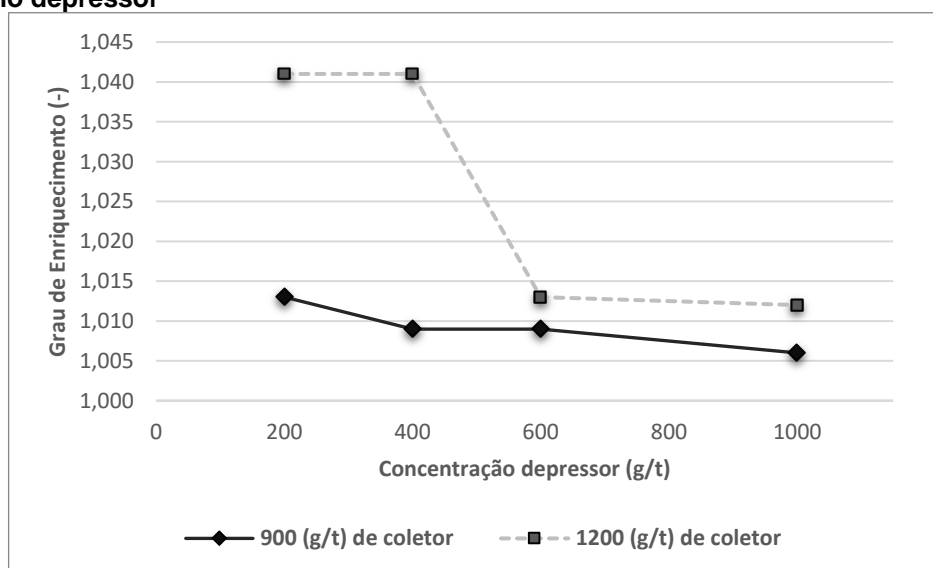
Figura 44 - Relação recuperação mássica em flotação convencional de bancada na presença pirofosfato de sódio como depressor:



Fonte: O autor (2019).

Os maiores graus de enriquecimento foram apresentados para 1200 g/t de ácido oleico. É possível ainda perceber que o acréscimo na dosagem do depressor já atua negativamente na limpeza dos concentrados, indicando produtos menos enriquecidos. Para a dosagem de 900 g/t de coletor o sistema apresentou pouca variação no enriquecimento dos concentrados, o que indica que a dosagem pode ser insuficiente para coletar as fases não ferrosas(Figura 45).

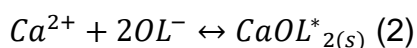
Figura 45 - Resultados ensaio de flotação em bancada convencional utilizando pirofosfato de sódio como depressor



Fonte: O autor (2021).

De acordo com os resultados expressos, embora o acréscimo na concentração do depressor indique um aumento do teor de Fe no concentrado, é notado a baixa seletividade do arranjo proposto.

Já foi reportado (PUGH & STENIUS, 1985) que os íons Ca^{2+} oriundos de carbonatos podem reagir com o oleato de sódio, formando precipitados através da equação (2).



Essa formação diminui a quantidade de oleato adsorvido na superfície das fases portadoras de Fe, diminuindo a flotabilidade das mesmas. Paralelamente, o precipitado não reduz a adsorção do oleato na calcita, ou seja, o carácter hidrofóbico deste carbonato é indiferente à presença de cátions Ca^{2+} na polpa. Partindo deste pressuposto, com o intuito de impulsionar o fenômeno, a adição do pirofosfato de sódio implicaria numa forte adsorção do pirofosfato de ferro na superfície das fases ferrosas, inibindo a ação do ácido oleico (WANG *et al.* 2018).

A baixa seletividade detectada para os ensaios pode ser justificada pelas constatações de LUO *et al.* (2016). Os mesmos discorrem sobre a possibilidade de os carbonatos liberarem a espécie $(\text{CO}_3)^{2-}$ ao entrar em solução e tal íon pode adsorver na superfície na superfície no quartzo e diminuir a flotabilidade do mesmo. Os autores apontaram a queda de aproximadamente 20 pontos percentuais no teor de Fe do produto afundado à medida que a concentração do íon era aumentada na polpa. Portanto, no presente sistema, para a depressão de fases ferrosas, o pirofosfato de sódio possui baixa eficiência quando utilizado o ácido oleico como coletor.

Os ensaios de flotação direta em bancada utilizando oleato de sódio como coletor e o quebracho como depressor estão expressos na Tabela 24.

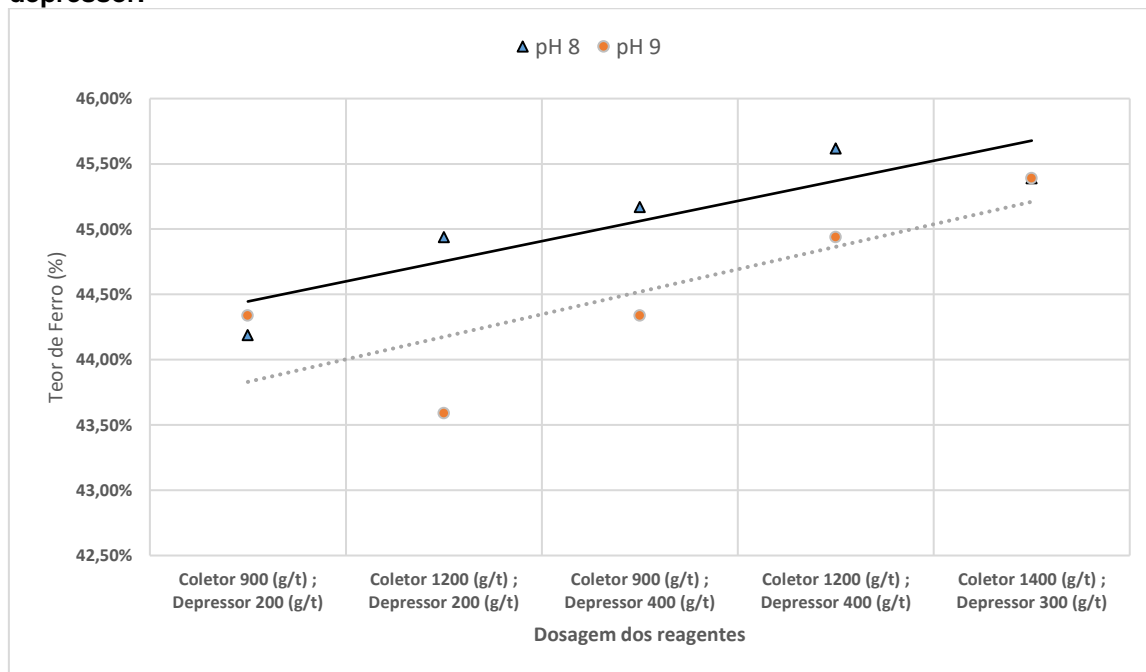
Tabela 24 - Resultados de flotação de bancada utilizando depressor quebracho.

Ensaio	pH	Dosagem Coletor (g/t)	Dosagem do depressor (g/t)	% de sólidos (%)	Recuperação Mássica (%)	Enriquecimento	Teor de ferro do concentrado (%)
1	9	900	200	15	38,45	1,07	44,34
2	9	1200	200	15	37,55	1,05	43,59
3	9	900	400	15	35,56	1,07	44,34
4	9	1200	400	15	37,38	1,09	44,94
5	8	900	200	15	38,45	1,07	44,19
6	8	1200	200	15	44,94	1,09	45,24
7	8	900	400	15	39,78	1,09	45,17
8	8	1200	400	15	37,38	1,10	45,62
9	9	1400	300	15	36,09	1,10	45,39
10	8	1400	300	15	45,39	1,10	45,37

Fonte: O autor (2021).

Embora ainda apresente um desempenho não otimizada, este arranjo de reagentes apresentou um avanço em comparação a utilização do pirofosfato de sódio. Os melhores resultados no que tange o conteúdo de fases ferrosas foram atingidos em pH 8, conforme a linha de tendência da Figura 46. A faixa vai de encontro ao observado por KULKARNI & SOMASUNDARAN (1980) com a máxima flotabilidade da hematita na presença do ácido oleico como coletor.

Figura 46 - Resultados ensaio de flotação em bancada convencional utilizando quebracho como depressor.



Fonte: O autor (2021).

Um ponto a ser ressaltado com relação a baixa seletividade observada nos ensaios seria que, a fração majoritária da alimentação se encontra abaixo de 30 μm , portanto sujeito aos grandes efeitos adversos que os finos possuem na flotação convencional. Problemas relacionados a alta área superficial, como consumo excessivo de reagentes, o fenômeno do *slime coating*, podem ter inibido a ação dos reagentes.

Trazendo o fenômeno de recobrimento superficial como destaque podemos recorrer a CORPAS-MARTÍNEZ *et al.* (2020) que salientam que embora os taninos sejam amplamente utilizados como depressores de quartzo e carbonatos existe uma dificuldade em deprimir com eficiência as duas fases cristalinas simultaneamente, os autores indicaram que a diferença de granulometria entre as duas fases pode implicar numa divergência entre a maneira que as partículas irão se comportar em suspensão. Tais autores chegaram a constatar em seu estudo que os carbonatos irão utilizar de uma baixa velocidade de agitação da polpa para potencializar a sua depressão (baixa adesão às bolhas), ao contrário da sílica, que necessita de condição com alta turbulência para quebrar os agregados aderidos às bolhas. Nos ensaios em questão a rotação do rotor se manteve à 1200 rpm.

Em associação, embora não especifique os mecanismos, WANG (2016) discorre sobre os efeitos depressivos que os taninos podem causar na hematita, com a utilização de coletores aniônicos com relação aos cátions Ca^{2+} .

Mediante as análises pode-se constatar que o método de flotação convencional nas condições analisadas se demonstra insuficiente para a concentração da presente amostra. A demanda por estudo de métodos alternativos de flotação, como flotação em coluna, flotação carreadora ou utilização da floculação seletiva por exemplo, se fazem necessários.

6- CONCLUSÃO

Após a caracterização química da lama de aciaria, encontraram-se teores de Fe igual a 49,33 %, Ca 9,17 %, Mg 1,94 % e Al 1,06 %, d_{50} em 70,54 μm com alta aderência à distribuição de Hill. Foram identificadas as seguintes fases cristalinas: wustita, magnetita, hematita, franklinita, calcita, grafita e quartzo. A área superficial específica da lama estudada foi de 0,66 m^2/g , com massa específica de 2922 kg/m^3 .

Os estudos de turbidez mostraram um maior índice de dispersão da lama de aciaria em pH 9 com adição de hexametáfosfato de sódio. Pressupõe-se que a adição do hexametáfosfato de sódio implica em adsorção de espécies aniônicas nas partículas, impondo carga superficial negativa nas fases cristalinas em questão, o que promove repulsão eletrostática. A individualização implica em um retardo no tempo de sedimentação das partículas, aumentando a turbidez da suspensão. Já com relação ao metasilicato de sódio e silicato de sódio não houveram grandes variações com as respectivas aplicações. Ao variar o pH, o maior nível de turbidez foi atingido em pH 11.

A etapa de classificação foi adaptada do método industrial mais comum através separador helicoidal com a implementação do dispersante hexametáfosfato de sódio. O processo gerou duas frações com massas específicas de 3950 (*underflow*) e 3570 (*overflow*) kg/m^3 , compostas em sua maior parte por fases ferrosas, e implicou em partição mássica de aproximadamente 77 % para o *overflow*. Os tamanhos médios de partícula foram 349,54 μm e 56,96 μm para *underflow* e *overflow* respectivamente.

Com relação aos estudos exploratórios de concentração densitários, o processo jigue apresentou concentrados mais limpos em relação a mesa oscilatória, com concentrados com massas específicas de 4320 e 4250 kg/m^3 , respectivamente. A separação se deu com bastante influência da granulometria, onde foi verificado a segregação do material.

Através dos métodos magnéticos pode-se avaliar a importância da etapa prévia de classificação, a mesma permitiu a obtenção de concentrados com maiores massas específicas e rejeitos com conteúdo reduzido de fases ferrosas em relação as

alíquotas não tratadas. Na concentração em separador do tipo tambor a etapa de classificação foi a variável com maior influência para obtenção de concentrados com maiores massas específicas. A fração com granulometria mais grossa se demonstrou mais susceptível ao tratamento através de métodos magnéticos, a relação teor/recuperação, avaliando a etapa *rougher* e *scavenger*, foi o mais promissor das técnicas aplicadas.

O método de quantificação do conteúdo total ferro através da correlação entre as massas específicas das alíquotas e a metodologia proposta pela NBR ISO 9507 se mostrou eficiente.

A análise primária dos ensaios de flotação permitiu observar a necessidade da utilização de um agente depressor para auxiliar a seletividade do processo. Os melhores e mais consistentes resultados para as combinações de reagentes analisadas na flotação convencional em bancada foram utilizando o oleato de sódio como coletor e tanino como depressor para os carbonatos e silicatos. O teor máximo obtido foi de 45,62 % com alimentação de 41,32 % de Fe e com uma recuperação mássica de 37,38 %. O método foi impactado pelo fato de a alimentação ser composta majoritariamente de partículas bastante finas (lamas e coloides).

É importante ressaltar que a etapa de ensaios exploratórios não possuía o intuito de gerar produtos prontos para utilização e/ou prontamente satisfatórios para uma etapa de desbaste. Existem ainda diversos fatores a serem analisados em cada uma das técnicas propostas. O principal objetivo seria elucidar condições preliminares e promover uma discussão acerca do reaproveitamento do presente resíduo siderúrgico por métodos alternativos ao hidro e piro metalúrgicos já mais difundidos.

Conclui-se que a lama de aciaria possui uma complexidade de composição e morfologia muito grande, portanto, a viabilidade para a aplicação dos métodos de concentração, com intuito de recircular esse tipo de resíduo no processo de alto forno, não se passa somente na recuperação das fases ferrosas, mas, sim também pela mitigação de diversos contaminantes como o Zn e Mg. Ademais, uma análise acerca de todo os rejeitos e concentrados gerados se faz estritamente necessária para comprovar a eficácia da metodologia adotada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDURAKHMANOV, R.A. *Thermoanalytical and mossbauer spectroscopic " studies of phase transformations of amorphous chromium hydroxide*, J. **Therm. Anal. Calorim.** 33 (3) 857–863, 2001.
- ABAKA-WOOD, G. B.; ADDAI-MENSAH, J.; SKINNER, W. *A study of flotation characteristics of monazite, hematite, and quartz using anionic collectors.* **International Journal of Mineral Processing**, 158, 55–62, 2017.
- ALEXANDRINO, J. S.; PERES, A. E. C.; LOPES, G. M.; RODRIGUES, O. M. S. *Dispersion degree and zeta potential of hematite.* **Rem: Revista Escola de Minas**, 69(2), 193-198, 2016.
- ANDRADE, P.M.; VIEIRA, C.M.F; MONTEIRO, S.N; VERNILLI JR., F. *Caracterização de lama fina de aciaria.* **49º Congresso Brasileiro de Cerâmica.** 6 a 9 de junho de 2005. São Pedro-SP, 2005.
- APOCALYPSE, F. A. **Utilização de métodos de análise na caracterização química e estrutural de compostos de zinco em resíduos de forno elétrico a arco em processos siderúrgicos.** 2016. 99f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares, Belo Horizonte.
- ARAÚJO, L.A. **Manual da Siderurgia.** São Paulo: Arte & Ciências, 2007.
- ARCELORMITTAL. **Relatório interno sobre os usos de lama de aciaria.** Belo Horizonte, 2009.
- ARION, A.; BARONNET, F.; LARTIGES, S.; BIRAT, J. P. *Characterization of emissions during the heating of tyre contaminated scrap.* **Chemosphere**, 42(5-7), 853–859, 2001.
- AROL, A.I.; IWASAKI, I. *Effect of Sodium Silicate on Flocculation of Hematite with Starch in the Presence of Calcium.* **Separation Science and Technology**, 38, 647 – 659, 2003.
- BAGATINI, M.C.; ZYMLA, V.; OSÓRIO, E.; VILELA, A. C. *Characterization and Reduction Behavior of Mill Scale.* **ISIJ Internacional**, vol. 51, 7, 1072-1079, 2011.
- BALTAR, C.M. **Flotação no Tratamento de Minérios.** Recife: UFPE, 2010.
- BALTAR, C. A. M.; RAMOS, L.T.S. **Efeito coletor de reagentes espumantes em diferentes superfícies minerais.** 1985. Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Minas. Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Recife, Pernambuco.

BARCELLOS, C.M.O. **Propriedades Magnéticas e estruturais de goetitas dopadas com gálio**. Porto Alegre: Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

BRASIL. Associação Brasileira das Normas Técnicas – ABNT. **Manual de gerenciamento de resíduos**. 2004.

_____. Associação Brasileira das Normas Técnicas – ABNT. **Determinação de teor de ferro total – Método de redução por cloreto de titânio**. 2003.

BILGEN, S., WILLS, B.A. *Shear flocculation — A review*. **Minerals Engineering**, 4 (3-4), p. 483–487. 1991.

BREHM, F.; GRAFFITTI, D.; MORAES C.A.; VILELA, A. Desenvolvimento de um método para digestão de pós de aciaria elétrica com vistas à caracterização química do resíduo. Congresso em ciência de materiais do Mercosul. **Anais...** Joinville: 1o Sulmat, 2001, p. 448-45.

BRUCKARD, W.J.; DAVAEY, J.T.; WOODCOCK, J.T. *Characterisation of Australian electric arc furnace (EAF) dusts and the application of simple physical separation techniques to upgrade them*. **Proceedings Green Processing**, 43-48, 2006.

BRUCKARD, W.J.; DAVEY, K.J.; RODOPOULOS T., WOODCOCK, J. T.; ITALIANO, J. *Water Leaching and Magnetic Separation for Decreasing the Chloride Level and Upgrading the Zinc Content of EAF Steelmaking Baghouse Dusts*. **International Journal of Mineral Processing**. Vol. 75, 1-20. 2005.

BULATOVIC, S.M. **Handbook of flotation reagents – Chemistry, theory and practice: flotation of sulfide ores**. 1ª ed. Amsterdam: Elsevier, 446p, 2007.

CANTARINO, M.V. **Estudo da remoção de zinco e de álcalis contidos em lamas de aciaria LD**. Dissertação (Mestrado). 2011. 97f. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte.

CHAVES, A.P.; LEAL FILHO, L.S.; BRAGA, P. F. A. **Flotação**. In: LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A. Tratamento de minérios. 5. ed. CETEM/MCT. Capítulo 10, p. 463-513. Rio de Janeiro, 2010.

CHEN, H.K.; CI, L.; LIU, S.H. *Carbothermic reduction of sludges of blast furnace and basic oxygen furnace*. **Scand J Metallurgy**, 21, 218-222, 1992.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 382, 26 de dezembro de 2006. **Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas**; publicada no Diário Oficial da União em 02/01/2007. Brasília, DF.

CORNELL, R.M.; SCHWERTMANN, U. **The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses**. 2nd edition. Weinheim: Wiley-VCH, 2000.

CORPAS-MARTÍNEZ, J. R.; CALERO, M.; PÉREZ, A.; MARTÍN-LARA, M. A.; AMOR-CASTILLO, C.; NAVARRO-DOMÍNGUEZ, R. *Influence of physical and chemical parameters on ultrafine fluorspar froth flotation*. ***Powder Technology***, 2020.

COSTA, J. L. **Seletividade na Flotação de Minérios Ferríferos Dolomíticos**. 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Pós-graduação em Engenharia Mineral, Ouro Preto.

COSTA, M.M. **Princípios de ecologia industrial aplicados à sustentabilidade ambiental e aos sistemas de produção de aço**. Tese (Doutorado). 2002. 271f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Engenharia, Rio de Janeiro.

CRUELLES, M.; ROCA, A.; NÚÑEZ, C. *Electric Arc Furnace Flue Dusts: Characterization and Leaching with Sulphuric Acid*. ***Hydrometallurgy***. Vol. 31, 213-231. 1992.

CULLITY, B.D.; STOCK, S.R. ***Elements of X-ray Diffraction***.: 3. ed. Pearson New International Edition, London, 2013.

DAS, A.; SARKAR, B. *Advanced Gravity Concentration of Fine Particles: A Review*. ***Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review***, 37p, 2018.

DAS, B.; PRAKASH, S.; REDDY, P.S.; MISRA. *An overview of utilization of slag and sludge from steel industries*. ***Resources, Conservation & Recycling***, vol. 50, 1, 40-57, 2006.

DUTRA, A.J.B.; PAIVA, P.R.P.; TAVARES, L.M. *Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust*. ***Minerals Engineering***, n. 5, p. 478-485, 2006.

FATHY, M.; MOGNY, T. A.; MOUSA, M. A.; EL-BELLIHI, A.A; AWADALLAH, A.E. *Sulfonated Ion Exchange Polystyrene Composite Resin for Calcium Hardness Removal*. ***International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering***. Vol. 5, 20 - 29, 2015.

FIGUEIREDO, P.C.; CHAVES, A.P. **Recuperação de partículas minerais finas e ultrafinas no âmbito da concentração gravítica**. Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. 1998.

FRIEDRICH, A.; KUNZ, M.; SUARD, E. *Temperature-dependent neutron powder diffraction study of the Ba(OD)₂ polymorphs: a new low-temperature phase*, ***Acta Crystallogr. B*** B57, 747–758, 2001.

FUERSTENAU, D.W.; LI, C.; HANSON, J.S. *Shear flocculation and carrier flotation of fine hematite*. ***Production and Processing of Fine Particles***, p. 329–335. 1988

GARGUL, K.; BORYCZKO, B. *Removal of zinc from dusts and sludges from basic oxygen furnaces in the process of ammoniacal leaching*. ***Archives of Civil and Mechanical Engineering XV***, vol.15, 1, 179-187, 2014.

GELDENHUIS, J.M.A. *Recovery of valuables from flue dust fines*. **Minerals Engineering**, vol. 15, 95-98, 2002.

GRILLO, F.F. **Recuperação do Zn e Fe da poeira de aciaria elétrica proveniente da produção de aço carbono**. Tese (Doutorado). 2011. 80f. Instituto Federal do Espírito Santo, Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Vitória.

GUEZENNEC, A. G.; HUBER, J. C.; PATISSON, F.; SESSIECQ, P.; BIRAT, J. P.; ABLITZER, D. *Dust formation by bubble-burst phenomenon at the surface of a liquid steel bath*, **ISIJ International**, 44, p. 1328- 1333, 2004.

HAY, S.M.; RANKIN, W.J. *Recovery of iron and zinc from blast furnace and basic oxygen furnace dust: a thermodynamic evaluation*. **Minerals Engineering**, vol. 7, 985-1001, 1994.

JENA, S.K.; SAHOO, H.; RATH, S.S.; RAO, D.S.; DAS, S.K.; DAS, B. *Characterization and Processing of Iron Ore Slimes for Recovery of Iron Values*. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, vol. 36, 174-182, 2014.

JIMÉNEZ, C.; TALAVERA, B.; SÁEZ, C.; CAÑIZARES, P.; RODRIGO, M.A. *Study of the production of hydrogen bubbles at low current densities for electroflotation processes*. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, 85(10), 1368–1373, 2010.

KAWATRA, S.K. **Fundamental Principles of Froth Flotation**. In: P. Darling, *SME Mining Engineering Handbook* (1984f). Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2011.

KETKAR, D.R.; MALLIKARJUNAN, R.; VENKATACHALAM, S. *Electroflotation of quartz fines*. **International Journal of Mineral Processing**, 31(1-2), p. 127–138. 1991.

KING, R.P. *Magnetic Separation*. In: KING, R.P. **Modeling & Simulation of Mineral Processing Systems**. 1 ed. Butterworth Heinemann, Chapter 8, p. 269-288, 2001.

KLASSEN, V.I.; MOKROUSOV, V.A. **An Introduction to the theory of flotation**. London, Butterworths, c.18, p.403, 1963.

KULKARNI, R.D.; SOMASUNDARAN, P. *Flotation chemistry of hematite/oleate system*. **Colloids and Surfaces**, vol. 1(3-4), 387–405, 1980.

KUMAR, R.; MANDRE, N.R. *Recovery of iron from iron ore slimes by selective flocculation*. **J. S. Afr. Inst. Min. Metall.**, Johannesburg, v. 117, n. 4, p. 397-400, 2017.

LAFOREST, G.; DUCHESNE, J. *Characterization and Leachability of Electric Arc Furnace Dust Made from Remelting of Stainless Steel*. **Journal of Hazardous Materials**, vol. 135, 156-164. 2006.

LASKOWSKI, J.S.; LIU, Q.; O'CONNOR, C.T. *Current understanding of the mechanism of polysaccharide adsorption at the mineral/aqueous solution interface. International Journal of Mineral Processing*, vol. 84,1-4, p. 59-68, 2007.

LI, D.; YIN, W.; LIU, Q.; CAO, S.; SUN, Q.; ZHAO, C.; YAO, J. *Interactions between Fine and Coarse Particles in Aqueous Suspension and their Implications for Flotation. Minerals Engineering*, n.114, p. 74 - 81. 2017.

LIANG, L.; ZHANG, T.; PENG, Y.; XIE, G. *Inhibiting heterocoagulation between microcrystalline graphite and quartz by pH modification and sodium hexametaphosphate. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 553, 149 – 154, 2018.

LIU, Q.; LASKOWSKI, J. S.; YE Li; WANG, D. Synergistic Effect of Mineral Surface Constituents in Dextrin Adsorption. *International Journal of Mineral Processing*, vol. 42, p. 251-266, 1994.

LOBATO, N. C. C. **Gerenciamento de resíduos sólidos na indústria siderúrgica.** 2014. 68f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Belo Horizonte.

LOPES, G.M; LIMA, R.M.A. Flotação direta de minério de ferro com oleato de sódio. **REM: Revista Escola de Minas**, 62f. 323-329. 2009.

LU, J.; YUAN, Z.; LIU, J.; LI, L.; ZHU, S. Effects of magnetite on magnetic coating behavior in pentlandite and serpentine system. *Minerals Engineering*, vol. 72, 115 – 120, 2015.

LUO, X.; WANG, Y.; WEN, S.; MA, M.; SUN, C.; YIN, W.; MA, Y. *Effect of carbonate minerals on quartz flotation behavior under conditions of reverse anionic flotation of iron ores. International Journal of Mineral Processing*, vol. 152, 1–6, 2016.

MA, M. *The significance of dosing sequence in the flocculation of hematite. Chemical Engineering Science*, vol. 73, p. 51–54, 2012.

MA, N. *Recycling of basic oxygen furnace steelmaking dust by in-process separation of zinc from the dust. Journal of Cleaner Production*, vol. 112, 4497-4504, 2016.

MA, N.; HOUSER, J. B. *Recycling of steelmaking slag fines by weak magnetic separation coupled with selective particle size screening. Journal of Cleaner Production*, vol. 82, 221–231, 2014.

MACHADO, A T. **Estudo da Incorporação e Estabilização do Pó de Aciaria Elétrica em Matrizes de Cerâmica Vermelha.** Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005. 209p.

MACHADO, J.G.; BREHM, F.A.; MORAES, C.A.; SANTOS, C.D.; VILELA, A.C.; CUNHA, J.B. *Chemical, physical, structural and morphological characterization of the electric arc furnace dust. Journal of Hazardous Materials*, vol. 136, 3, 953-960, 2006.

MAHROUQI, D.A.; VINOGRADOV, J.; & JACKSON, M.D. *Zeta potential of artificial and natural calcite in aqueous solution*. **Advances in Colloid and Interface Science**, vol. 240, 60–76, 2017.

MAJUSTE, D.; MANSUR, M.B. *Characterization of the Fine Fraction of the Argon Oxygen Decarburization with Lance (AOD-L) Sludge Generated by the Stainless Steelmaking Industry*. **Journal Hazardous Materials**, vol. 153, 89-95. 2008.

MANNA, M.; SASMAL, S.; BANERJEE, P.K.; SENGUPTA, D.K. *Effect of mineral geology, mineral size and settling time on selective dispersion and separation process for recovering iron value from iron ultra fines*. **Powder Technology**, vol. 211, 60 – 64, 2011.

MARTINS, F.M.; NETO, J.M.R.; CUNHA, C.J. *Mineral phases of weathered and recent electric arc furnace dust*. **Journal of Hazardous Materials**, vol. 154, 417-425, 2008.

MENAD, N.; KANARI, N.; SAVE, M. *Recovery of high grade iron compounds from LD slag by enhanced magnetic separation techniques*. **International Journal of Mineral Processing**, vol. 126, 1–9, 2014.

MENDES, J. J. **Influência da adição da lama fina de aciaria a oxigênio nas características físicas e microestruturais de pelotas queimadas de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado). 2009. 79f. Universidade Federal de Ouro Preto, Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Ouro Preto.

METZ, J. C. **Avaliação do uso combinado de pó de aciaria elétrica (PAE) com resíduo do forno de cal (RCF) na hidratação de pastas de cimento**. Dissertação (Mestrado). 2016. 126f. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo.

MISHRA, S.K. *Electrokinetic properties and flotation behaviour of apatite and calcite in the presence of sodium oleate and sodium metasilicate*. **International Journal of Mineral Processing**, vol. 9(1), p. 59–73. 1982.

MONTOVANI, M. C.; TAKANO C.; CAVALLANTE, F. L. *Caracterização de três tipos de poeiras geradas em fornos elétricos a arco*. In: **53º Congresso Anual da ABM**, 1998, Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo: ABM, 1998, p. 1329-1343.

NI, X; LIU, Q. *Adsorption behaviour of sodium hexametaphosphate on pyrochlore and calcite*. **Canadian Metallurgical Quarterly**, vol. 52. 473-478. 2013.

NOLASCO-SOBRINHO, P.J.; ESPINOSA, D.C.; TENÓRIO, J.S. *Characterisation of dusts and sludges generated during stainless steel production in Brazilian industries*. **Ironmaking and Steelmaking**, vol. 30, 1, 11-17, 2003.

NYIRENDA, R.L. *The processing of Steelmaking Flue-Dust: A Review*. **Minerals Engineering**, vol. 4, 7-11, p.1003-1025.1991.

PAIS, R. W. D. **Estudo da Viabilidade de Utilização de Lama de Aciaria como Matéria Prima para Produção de Materiais Magnéticos**. 2010. 108f. Dissertação

(Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Ouro Preto.

PAULA, L. N. **Transformação do pó de aciaria elétrica em materiais com aplicações para remediação ambiental**. 2013. 113f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Alfenas, Pós-Graduação em Química, Alfenas.

PEREIRA, E.A.C. **Emprego de rejeitos siderúrgicos pelotizados na sinterização de minério de ferro**. 1982. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Belo Horizonte.

PITA, F.A.G. **Influência do Equipamento na Flotação por Espumas: Célula Mecânica Versus Coluna**. Série Rochas e Minerais Industriais, Vol. 5, p. 5-10. CETEM/MCT, Rio de Janeiro. 2001

PUGH, R.; STENIUS, P. *Solution chemistry studies and flotation behaviour of apatite, calcite and fluorite minerals with sodium oleate collector*. **International Journal of Mineral Processing**, vol. 15(3), p. 193–218. 1985.

RABELO, P.J.B. **Estudos de caracterização e redução do teor de fósforo do minério de ferro da mina de Alegria, Mariana, MG**. 1994. 305f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Belo Horizonte.

RAJU, G.B.; KHANGAONKAR, P.R. *Electro-flotation of chalcopyrite fines*. **International Journal of Mineral Processing**, vol. 9, p. 133—143. 1982.

RAO, G.V.; MARKANDEYA, R.; SHARMA, S.K. *Recovery of iron values from Iron Ore Slimes of Donimalai Tailing Dam*. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, vol. 69, 143-150, 2015.

RAO, K.H.; BRITT-MARIE A.; FORSSBERG, E. *Flotation of Phosphatic Material Containing Carbonatic Gangue Using Sodium Oleate as Collector and Sodium Silicate as Modifier*. **International Journal of Mineral Processing**, vol. 26. 123-140.1989.

RAO, S.R. **Surface Chemistry of Froth Flotation**. New York: Plenum Press, 2004.

REIS, O.B. **Estudo preliminar sobre a reciclagem das aminas utilizadas em flotação de minério de ferro**. 2004. 63f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Ouro Preto.

ROCHA, R.B. **Concentração de rejeito de flotação e lamas de minério de ferro por separação magnética**. 2018. 93f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Ouro Preto.

ROCHA, L.; PERES, A.E.C. **Estudo de aproveitamento econômico das lamas de uma mineração de ferro, através de concentração por flotação catiônica reversa**. 2008. 126f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

RODRIGUES, F. **Homem, trabalho e meio ambiente: desenvolvimento e sustentabilidade**. 2009. 106f. Dissertação (Mestrado), Universidade de Caxias do Sul, Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Caxias do Sul.

RUBIO, J.; HOBERG, H. *The process of separation of fine minerals particles by flotation with hydrophobic polymeric carrier*. **International Journal of Mineral Processing**, vol. 33, 321-352, 1993.

SAMPAIO, C.H.; TAVARES, L.M.M. **Beneficiamento Gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade**. Porto Alegre: Editora da UFRG. 603 p, 2005.

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

SAMPAIO, J.A; BRAGA, P.F.A; DUTRA, A.J.B. Grafita. In: LUZ, A.B; LINS, F.A.F. **Rochas e Minerais Industriais**. 2ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 2008. Cap. 40, p.527-549.

SARKAR, S.; MAZUMBER, D. *Solid Waste Management in Steel Industry - Challenges and Opportunities*. **Internacional Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering**, vol. 9, 984-987, 2015.

SARMA, B.; DOWNING, K.B.; AUKRUST, E. *Recovery of Iron, Carbon and Zinc from Steel Plant Waste Oxides using the AISI-DOE Postcombusting Smelting Technology*. In: *Steelmaking Conference*, 1996, Pittsburgh. **Proceedings**, p. 667-684.

SAUERT, F.; FLEINSCHANDERL, A.; PESL, J.; GEBERT, W. *Zinc Management and recycling within the iron and steel industry*. In: *Learn Strategies for Coping with Steel Mill Wastes and Profiting from By-Products*, 1999, Pittsburgh. **Proceedings**, p. 17-19.

SGM. (22 de Setembro de 2020). **Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico**. Fonte: Ministério de Minas e Energia: <http://www.mme.gov.br>. Acesso: 04/12/2020.

SILVA, J.P.P. BALTAR, C.A.M. GONZAGA, R.S.G. PERES, A.E.C. LEITE, J.Y.P. *Identification of sodium silicate species used as flotation depressants*. **Minerals and Metallurgical Processing**. vol. 29, p. 207-210. 2012.

SILVA, M.C. **Reciclagem de pó de aciaria elétrica como matéria-prima na fabricação de materiais cerâmicos argilosos: Controle das emissões atmosféricas de Zinco**. 2006. 139f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais.

SINGH, S.; SAHOO, H.; RATH, S.S.; SAHU, A.K.; DAS, B. *Recovery of iron minerals from Indian iron ore slimes using colloidal magnetic coating*. **Powder Technology**, vol. 269, 38-45, 2015.

SINGH, Y.; DESHPANDE, R.J.; SUBRAMANIAN, S. *Surface-Chemical Studies on Graphite Suspensions using Inorganic Dispersants*. In: *Proceedings of the International Seminar on Mineral Processing Technology and Indo-Korean Workshop on Resource Recycling*, 2006, Chennai. **Proceedings**, p. 292 – 296.

SIVAMOCHAN, R. *The problem of recovering very fine particles in mineral processing – a review*. **International Journal of Mineral Processing**, vol. 28, p. 247– 288. 1990.

SIVAMOCHAN, R.; FORSSBERG, E. *Recovery of heavy minerals from slimes*. **International Journal of Mineral Processing**, vol. 15(4), p. 297–314.1985.

SKOOG, D.; WEST, D.; HOLLER, J. **Fundamentals of analytical chemistry**. Philadelphia: Saunders, 7ed., 1982. 870p.

SOBRINHO, V.P.F.M; OLIVEIRA, J.R.; TENÓRIO, J.A.S; ESPINOSA, D.C.R. *Reciclagem de Poeira de Aciaria Elétrica*. In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. **Anais...** Campos do Jordão: CBECiMat, 2010, p. 7361 – 7368.

SOBRINHO, V.P.F.M. **Adição de poeira de aciaria elétrica em ferro gusa líquido**. 2012. 106f. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo.

SOMASUNDARAN, P. *An overview of the ultrafine problem*. In: B.A. Wills and R.W. Barley (Editors), **Mineral Processing at a Crossroads**. NATO ASI Series, Applied Sciences, Nijhoff, The Hague, p. 1-36. 1986.

SOMASUNDARAN, P.; DAS, K. K.; YU, X. *Selective flocculation*. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, vol. 1(4), 530–534. 1996.

SONG, S.; LU, S.; LOPEZ-VALIVIESCO, A. *Magnetic separation of hematite and limonite fines as hydrofobic flocs from iron ores*. **Minerals Engineering**, vol.15, 415-422, 2002.

SOUZA, E.L. **Estudo e desenvolvimento de um processo de tratamento de resíduos siderúrgicos através da técnica de bombardeamento ultra-sônico**. 2006. 119f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Ouro Preto, Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Ouro Preto.

STEFANOVA, A.; AROMAA, J. **Alkaline leaching of iron and steelmaking dust**. **Department of Materials Science and Engineering**. *Science and Engineering Aalto University publication series Science+ technology*. 72f. Finland: Helsinki, 2012.

SUN, Z.X.; SU, F.W.; FORSLING, W.; SAMSKOG, P.O. *Surface Characteristics of Magnetite in Aqueous Suspension*. **Journal of Colloid and Interface Science**, vol. 197(1), 151–159, 1998.

SRIVASTAVA, M.P.; PAN, S.K.; PRASAD, N.; MISHARA, B.K. *Characterization and processing of iron ore fines of Kiriburu deposit of India*. **Mineral Processing**, vol. 61, 2, 93-107, 2001.

TAKANO, C.; CAPOCCHINI, J.D.; NASCIMENTO, R.C.; MOURÃO, M.B.; LENZ, G.; SANTOS, D.M. A reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos. **Anais...** São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2000.

TAKANO, C.; MANTOVANI, M.C.; CAVALLANTE, F.L.; MOURAO, M.B. *Electric arc furnace dust characterization and recycling by self reducing pellets*. In: *First Japan–Brazil Symposium on dust processing-energy-environment in metallurgical industries*, 1999, São Paulo. **Anais...**São Paulo: s.n., 1999, p. 37-48.

TARLING, D.H.; HROUDA, F. ***The Magnetic Anisotropy of Rocks***. Londres: Chapman & Gall, 1993.

TAYLOR, J.C., ZUNKEL, A.D. *Environmental Challenges for the Lead-Zinc Industry*. **JOM**, vol. 40, 27–30, 1988.

TESTA, F.G. **Avanços na Flotação de Finos de Minério com Condicionamento em Alta Intensidade**. 2008. 98 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre.

TRUNG, Z.A.; KUKURUGYA, F.; TAKACOVA, Z.; ORAC, D.; LAUBERTOVA, M.; MISKUFOVA, A.; HAVLIK, T. *Acidic leaching both of zinc and iron from basic oxygen furnace sludge*. **Journal of Hazardous Materials**, vol. 192 (3), 1100-1107, 2011.

TSUBOUCHI, N.; HASHIMOTO, H.; OHTAKA, N.; OHTSUKA, Y. *Chemical characterization of dust particles recovered from bag filters of electric arc furnaces for steelmaking: Some factors influencing the formation of hexachlorobenzene*. **Journal of Hazardous Materials**, vol. 183, p. 116-124, 2010.

TSUGITA, Y. Problems and Prospects of Halogen Element Contained Dust Treatment in Recycling. **Materials Transactions**, vol. 44, 2422 -2426, 2003.

VIEIRA, C.M.; INTORNE, S.C.; JÚNIOR, F.V.; MONTEIRO, S.N. Cerâmica vermelha incorporada com lama fina de aciaria. **Revista Matéria**, 269-275, 2006.

VIEIRA, C.M.F., ANDRADE, P.M., MACIEL, G.S., VERNILLI Jr, F., MONTEIRO, S.N. *Incorporation of Fine Steel Sludge Waste into Red Ceramic*. **Materials Science & Engineering**, vol. 427, 142-147, 2007.

WAKAMATSU, T.; NUMATA, Y. *Flotation of graphite*. **Minerals Engineering**, vol. 4 (7-11), 975–982. 1991.

WANG, D. ***Flotation Reagents: Applied Surface Chemistry on Minerals Flotation and Energy Resources Beneficiation: Functional Principle***. Volume 1. Singapura: Springer, 2016.

WANG, Y.; LU, D.; WANG, L. *Flotation separation of limonite from calcite with sodium oleate: effects of calcite dissolution and addition of sodium pyrophosphate*. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy**, vol. 128, 4, 6p., 2018.

WILLS, B.A.; NAPIER-MUNN, T. ***Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery***. 7^a ed. Oxford: Elsevier Science e Technology Books, 2006.

WU, L.M. *Characteristics of steelmaking flue dust*. ***Ironmaking & steelmaking***, vol. 26, p. 372–377, 1999.

YALCIN, T.; BYERS, A.; UGHADPAGA, K. *Dissolved gas method of generating bubbles for potential use in ore flotation*. ***Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review***, vol. 23, p. 181-197, 2002

XIA, D.K., PICKLES, C.A., *Microwave caustic leaching of electric arc furnace dust*, ***Minerals Engineering***, vol. 13, 79-94, 2000.

ZEYDABADI, B.A.; MOWLA, D.; SHARIAT, M.H.; KALAJAHI, J.F. *Zinc recovery from blast furnace flue dust*. ***Hydrometallurgy***, vol. 47, 113-125, 1997.

ZHANG, N. R. FAHMI; W. T. NORRIS, *Flicker analysis and methods for electric arc furnace flicker (EAF) mitigation (a survey)*, In: ***IEEE Porto Power Tech, 2001, Porto. Proceedings...*** Porto: IEEE, 2002, vol.1, 6p.

APÊNDICE A – PREPARO DE SOLUÇÃO DE REAGENTES

Saponificação Oleato de sódio

A preparação da solução de oleato de sódio a 1% p/v foi feita pela saponificação a frio do ácido oleico conforme passos a saber:

- a) Pesou-se 1 g de ácido oleico em béquer de 50 ml;
- b) Adicionaram-se 10 ml de água destilada sob agitação;
- c) Inseriu-se 1,7 ml de solução alcoólica de NaOH a 10 % p/v, ainda sob agitação até a obtenção de uma solução de cor amarelada;
- d) Adicionaram-se mais 10 ml de água destilada e a agitação mantida até a solubilização total do oleato;
- e) Dilui-se a solução em balão volumétrico de 100 ml para a obtenção da concentração desejada.

Solução de hexametáfosfato de sódio

A preparação da solução de hexametáfosfato de sódio a 1% p/v foi feita conforme passos a saber:

- a) Pesou-se 1 g de hexametáfosfato de sódio em béquer de 50 ml;
- b) Adição de água destilada sob agitação;
- c) Dilui-se a solução em balão volumétrico de 100 ml para a obtenção da concentração desejada.

Solução de silicato de sódio

A preparação da solução de silicato de sódio a 1% p/v foi feita conforme passos a saber:

- a) Pesou-se 1 g de silicato de sódio em béquer de 50 ml;
- b) Adição de água destilada sob agitação;
- c) Dilui-se a solução em balão volumétrico de 100 ml para a obtenção da concentração desejada.

Solução de metassilicato de sódio

A preparação da solução de metassilicato de sódio a 1% p/v foi feita conforme passos a saber:

- a) Pesou-se 1 g de metassilicato de sódio em béquer de 50 ml;
- b) Adição de água destilada sob agitação;
- c) Dilui-se a solução em balão volumétrico de 100 ml para a obtenção da concentração desejada.

Solução de pirofosfato de sódio

A preparação da solução de pirofosfato de sódio a 1% p/v foi feita conforme passos a saber:

- a) Pesou-se 1 g de pirofosfato de sódio em béquer de 50 ml;
- b) Adição de água destilada sob agitação;
- c) Dilui-se a solução em balão volumétrico de 100 ml para a obtenção da concentração desejada.

APÊNDICE B – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA POR MEIO DE PICNOMETRIA

A determinação da massa específica das alíquotas do estudo em questão, realizou-se ensaios com picnômetro vazio. O método utilizado foi o apresentado por Dana e Hurbult (1976), onde são os utilizados as massas do picnômetro vazio, picnômetro somente com o fluido e picnômetro com a suspensão de sólidos e fluido. A equação utilizada foi:

$$d_{\text{minério}} = \frac{(M_2 - M_1)}{(M_2 + M_4) - (M_1 + M_3)} \quad (2)$$

Onde:

M_1 – Massa picnômetro vazio;

M_2 – Massa do picnômetro com o sólido;

M_3 – Massa do picnômetro com fluido e sólido;

M_4 – Massa do picnômetro com o fluido.