



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS - DEMIN



EMILCY DAS GRAÇAS GUIMARÃES TOTTI

**REPROCESSAMENTO DE UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO POR MEIO DE
CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA E FLOTAÇÃO**

Ouro Preto
Fevereiro de 2024

EMILCY DAS GRAÇAS GUIMARÃES TOTTI

REPROCESSAMENTO DE UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO POR MEIO DE
CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA E FLOTAÇÃO

Monografia submetida à apreciação da banca examinadora de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Dra. Francielle Câmara Nogueira

Ouro Preto
Fevereiro de 2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T718r Totti, Emilcy das Graças Guimarães.
Reprocessamento de um rejeito de minério de ferro por meio de
concentração magnética e flotação. [manuscrito] / Emilcy das Graças
Guimarães Totti. - 2024.
104 f.: il.: color., tab..

Orientadora: Dra. Francielle Câmara Nogueira.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério - Separação magnética. 2. Minério de
ferro. 3. Flotação. I. Nogueira, Francielle Câmara. II. Universidade Federal
de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.778

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Emilcy das Graças Guimarães Totti

Reprocessamento de um rejeito de minério de ferro por meio de concentração magnética e flotação

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel.

Aprovada em 19 de fevereiro de 2024

Membros da banca

Dra. - Francielle Câmara Nogueira - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Ma. - Stephânia da Consolação Silva Nogueira - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. - Carlos Alberto Pereira - Universidade Federal de Ouro Preto

Francielle Câmara Nogueira, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 22/02/2024



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Alberto Pereira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/02/2024, às 10:02, 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 **0671908** e o código CRC **56691C30**.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Silvana e Edmar, e à minha irmã, Ana Carolina, por serem a base da minha vida e me dar forças todos os dias, por nunca me deixarem desistir. É tudo sempre por vocês.

Às minhas tias, Néia, Fátima, Natielly e Sabrina, meu tio Jonatas, e minha avó, Almerinda, por sempre acreditarem em mim e me apoiarem de todas as formas possíveis.

À toda a minha família, pelo carinho, união e incentivos durante toda a vida.

A Victor, pelo amor e companheirismo sempre, por acreditar e apoiar meus sonhos, e por vivê-los ao meu lado.

Aos meus amigos de Ouro Preto, por crescerem comigo e estarem sempre presentes, em especial Júlia Martins, Isabela Gomes, Felipe Fagundes, Maria Clara Rodrigues, Katarine Fagundes, Bárbara Botaro e Ana Livia Machado.

Aos meus amigos da UFOP, por viverem isso comigo e por todos os momentos vividos nestes cinco anos, em especial Taís Ribeiro, Cassio Henrique, Amanda Santos, Vagner Carvalho, Crislaine Souza, Fernanda costa, Altamiro Rodrigues e Felipe Camilo.

Aos professores Carlos Alberto Pereira, Felipe Ribeiro Silva, Stephânia Nogueira, e minha orientadora Francielle Câmara Nogueira, por todos os conselhos e oportunidades, pelo apoio em toda a minha graduação e por tanto ensinamentos transmitidos.

À Gerência de Planejamento de Mina da CSN Mineração, em especial Thaís Vilela e Pedro Henrique, por me dar minha primeira oportunidade de estágio e por tudo que tive a chance de aprender com vocês.

Ao centro de pesquisa da ArcelorMittal - Maizières, em especial meu tutor Marcello Cruz, por acreditar em mim e me dar tantas oportunidades de aprender e me desenvolver, e todos os engenheiros e técnicos que me auxiliaram e ensinaram tanto. Este trabalho não seria possível sem vocês.

À Fundação Gorceix, pelo apoio constante durante toda a graduação, e à CAPES e FAPEMIG pelo fomento à pesquisa.

À UFOP, em especial à Escola de Minas e a todo o corpo docente e colaboradores do Departamento de Engenharia de Minas, por todo conhecimento e estrutura fornecidos, por mudarem a minha vida.

Finalmente, a todos aqueles que fizeram a diferença em minha vida e graduação. Obrigada por me ajudarem a chegar aqui.

“Se te derem papel pautado, escreve de trás para frente”

Juan Ramón Jiménez

RESUMO

Este trabalho buscou avaliar a viabilidade do reprocessamento de três rejeitos de um minério de ferro africano, utilizando separação magnética e flotação catiônica reversa. O objetivo foi produzir um concentrado com 62% de teor de ferro e 5% de teor de impurezas. Os testes de separação magnética foram conduzidos em escala de bancada, utilizando o Tubo de Davis e escala piloto por meio de separadores magnéticos de tambor de baixa e média intensidades, variando a intensidade do campo magnético. Foram utilizadas as intensidades de 1700 e 4200 Gauss para a escala de bancada e 1700 e 7000 para a escala piloto. Os ensaios de flotação em bancada exploraram as dosagens de 100, 300 e 500 g/t do coletor amina Flotigam EDA. Adicionalmente, foram conduzidos ensaios de recirculação de um dos rejeitos no fluxograma original do processo. Os testes de separação magnética em escala piloto tiveram resultados consistentes com os encontrados em laboratório, e destacaram a influência das intensidades de campo magnético nos resultados. No entanto, nenhum concentrado atingiu as metas de recuperação e teor. A recirculação do rejeito no fluxograma original também não se mostrou viável. Nos testes de flotação, observou-se que a qualidade do concentrado melhorou com o aumento da dosagem do coletor. A flotação com dosagem de 500 g/t de coletor amina mostrou-se a alternativa mais viável para a recirculação do rejeito, permitindo uma recuperação de 24,27% da massa total, com 62,59% de ferro e 4,55% de impurezas.

Palavras-chave: minério de ferro; reprocessamento de rejeitos; separação magnética; flotação.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the feasibility of reprocessing three tailings from an African iron ore, using magnetic separation and reverse cation flotation. The goal was to produce a concentrate with 62% iron content and 5% impurity content. The magnetic separation tests were carried out on a bench scale using the Davis Tube and, on a pilot, scale using low and medium intensity magnetic drum separators, varying the intensity of the magnetic field. The intensity of 1700 and 4200 Gauss were used for the bench scale and 1700 and 7000 for the pilot scale. The bench-scale flotation tests explored dosages of 100, 300 and 500 g/t of the collector amine Flotigam EDA. In addition, tests were carried out on recirculating one of the tailings in the original process flowsheet. The magnetic separation tests on a pilot scale yielded results consistent with those found in the laboratory, and highlighted the influence of magnetic field intensities on the results. However, none of the concentrates met the recovery and grade goals. The recirculation of the tailings in the original flowsheet did not prove viable either. In the flotation tests, it was observed that the quality of the concentrate improved as the dosage of the collector increased. Flotation with a dosage of 500 g/t of amine collector proved to be the most viable alternative for recirculating the tailings, allowing recovery of 24.27% of the total mass, with 62.59% iron and 4.55% impurities.

Keywords: iron ore; tailings reprocessing; magnetic separation; flotation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização dos principais depósitos de minério de ferro do mundo	17
Figura 2 - Fluxograma de beneficiamento do minério de ferro da mina de Vargem Grande.....	20
Figura 3 - Casas modelo construídas a partir de rejeitos de minério de ferro	32
Figura 4 - Indução magnética dos diferentes minerais em função do campo magnético aplicado.....	35
Figura 5 - Tubo Magnético de Davis	36
Figura 6 - Separador Magnético de Tambor em escala piloto.....	37
Figura 7 - Diagrama esquemático apresentando o efeito das propriedades de partículas finas na flotação	41
Figura 8 - Curva típica da influência da concentração de amina na recuperação do mineral.....	43
Figura 9 - Fluxograma da ITM Flotação da empresa USIMINAS	47
Figura 10 - Rota de concentração do minério de ferro estudado, identificando a origem de cada rejeito	49
Figura 11 – Ensaios de concentração planejados para cada rejeito	51
Figura 12 - Tubo Magnético de Davis, modelo EDT.....	52
Figura 13 – Separadores magnéticos de tambor em escala piloto utilizados.....	54
Figura 14 - Fluxograma apresentando o processo de moagem, deslamagem e flotação dos rejeitos, bem como a porcentagem mássica que cada um representa	55
Figura 15- Moinho de Bolas em escala piloto Sepor	56
Figura 16 - Célula de Flotação de bancada Denver Metso	57
Figura 17 – Planejamento de recirculação do rejeito A no fluxograma original	61
Figura 18 - Loop de Ciclonagem LOOPBRAS Brastorno	62
Figura 19 - Amostra dos rejeitos A, B e C	65
Figura 20 - Distribuição granulométrica dos rejeitos A, B e C	66
Figura 21 - Difratograma de raio X do Rejeito B.....	70
Figura 22 - Difratograma de raio X do rejeito C.....	71
Figura 23 – Resultados dos ensaios de concentração com Tubo de Davis para o rejeito A	72
Figura 24 - Resultados do ensaio de concentração com Tubo de Davis com 4200 G para o rejeito B	73
Figura 25 - Resultados do ensaio de concentração com Tubo de Davis com 4200 G para o rejeito C	74

Figura 26 - Resultados dos ensaios de concentração com separadores magnéticos de tambor para o rejeito A	75
Figura 27 - Resultados dos ensaios de concentração com separadores magnéticos de tambor para o rejeito B	76
Figura 28 - Resultados do ensaio de concentração com separador magnético de tambor de 7000 G para o rejeito C	77
Figura 29 - Resultados dos testes de moagem para os rejeitos A e B.....	78
Figura 30 - Distribuição granulométrica do produto da moagem da mistura dos rejeitos A e B após 20 minutos	79
Figura 31 - Distribuição granulométrica dos produtos da deslamagem da mistura moída dos rejeitos A e B.....	80
Figura 32 - Distribuição granulométrica da alimentação da flotação	83
Figura 33 – Recuperação mássica e metalúrgica e teores de ferro e sílica dos três concentrados dos testes de flotação	85
Figura 34 - Relação entre dosagem de coletor e teores de ferro de sílica	86
Figura 35 - Distribuição granulométrica dos concentrados dos testes de flotação	87
Figura 36 - Distribuição granulométrica dos rejeitos dos testes de flotação.....	88
Figura 37 - Teor de ferro por faixa granulométrica dos concentrados dos testes de flotação	89
Figura 38 - Teor de sílica por faixa granulométrica dos concentrados dos testes de flotação	89
Figura 39 – Porcentagem em massa e teores de ferro e impurezas dos rejeitos usados no estudo, e do rejeito total formado pela mistura dos três.....	92
Figura 40 - Partição de massa do ensaio de deslamagem dos rejeitos A e B.....	92
Figura 41 - Composição mássica da alimentação dos testes de flotação	93
Figura 42 - Balanço de massa do reprocessamento dos rejeitos A, B e C, considerando os resultados de moagem, deslamagem e flotação com 500 g/t de amina.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classe e fórmula química dos principais minerais minério e minerais de ganda de depósitos de minério de ferro	16
Tabela 2 - Caracterização do rejeito de minério de ferro de diferentes minas	23
Tabela 3 - Marcos da legislação brasileira relacionada a rejeitos de mineração.....	26
Tabela 4 - Estudos que utilizaram eteraminas na flotação do minério de ferro, apresentando teor da alimentação e tipo e dosagens de eternamina utilizados.....	44
Tabela 5 - Parâmetros de cada etapa dos ensaios de flotação	58
Tabela 6 – Função, fabricantes de concentração da solução dos reagentes utilizados nos testes de flotação.....	58
Tabela 7 - Dosagens dos reagentes em cada teste	60
Tabela 8 – Aberturas das peneiras utilizadas nas análises granulométricas	64
Tabela 9 - Distribuição granulométrica dos rejeitos A, B e C	66
Tabela 10 - Composição química dos rejeitos A, B e C	67
Tabela 11 - Análise Granuloquímica do Rejeito A.....	68
Tabela 12 - Análise Granuloquímica do Rejeito B.....	68
Tabela 13 - Análise Granuloquímica do Rejeito C.....	69
Tabela 14 - Resultado da deslamagem da mistura moída dos rejeitos A e B	81
Tabela 15 – Análise granuloquímica do <i>overflow</i> da deslamagem dos rejeitos A e B.....	81
Tabela 16 - Análise granuloquímica do <i>underflow da deslamagem dos rejeitos A e B</i>	82
Tabela 17 - Resultados do teste de flotação 1 (100 g/t de amina)	83
Tabela 18 - Resultados do teste de flotação 2 (300 g/t de amina)	83
Tabela 19 - Resultados do teste de flotação 3 (500 g/t de amina)	84
Tabela 21 - Resultados do ensaio de recirculação do rejeito A no fluxograma original.....	90

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Minério de ferro	15
3.1.1	Beneficiamento do minério de ferro	17
3.2	Rejeitos de Minério de ferro	20
3.2.1	Disposição de rejeitos e aspectos ambientais e legais	25
3.3	Alternativas para o reaproveitamento do rejeito de minério de ferro	28
3.3.1	Construção civil e infraestrutura	28
3.3.2	Reprocessamento de rejeito através de rotas de concentração	33
4	METODOLOGIA.....	48
4.1	Caracterização das amostras.....	50
4.2	Separação Magnética em Escala de Bancada.....	51
4.3	Separação Magnética em Escala Piloto.....	53
4.4	Flotação em Escala de Bancada.....	54
4.5	Recirculação do rejeito A	60
4.6	Caracterização dos produtos	62
4.6.1	Análise mineralógica.....	62
4.6.2	Análise química	63
4.6.3	Análise de densidade	63
4.6.4	Análise granulométrica	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1	Caracterização dos Rejeitos	65
5.1.1	Análise Granulométrica	65
5.1.2	Análise Química.....	67
5.1.3	Análise de Densidade.....	69
5.1.4	Análise Mineralógica.....	70
5.2	Ensaio de Separação Magnética.....	71
5.2.1	Ensaio de Bancada (Tubo de Davis)	71
5.2.2	Ensaio em Planta Piloto (Separadores Magnéticos de Tambor)	74

5.3	Ensaio de Flotação.....	77
5.3.1	Preparação dos rejeitos A e B (moagem e deslamagem)	77
5.3.2	Ensaio de flotação em bancada.....	82
5.4	Ensaio de Recirculação do Rejeito A	90
5.5	Reprocessamento do rejeito e balanço de massa final.....	91
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
	REFERÊNCIAS.....	96

1 INTRODUÇÃO

O minério de ferro é atualmente um dos principais bens minerais produzidos e explorados no Brasil, correspondendo a 5,13 bilhões de reais em arrecadação CFEM para a União em 2023 e 0,4 bilhões de toneladas de produto beneficiado em 2022 (ANM, 2023). Diante do avanço da sociedade e do aumento global na demanda por bens de consumo, houve uma intensificação na produção mundial de ferro, levando à exaustão ao longo do tempo das grandes reservas de minério de ferro de alto teor metálico (Fernández-González; Piñuela-Noval; Verdeja, 2017; Ormond, 2021).

Nesse contexto, as empresas voltaram-se para a exploração de depósitos com médio a baixo teor de ferro para atender às crescentes demandas da indústria. No entanto, essa mudança resultou no aumento progressivo da produção de rejeitos durante o beneficiamento do minério de ferro. Anualmente, o rejeito de minério de ferro representa entre 30 e 40% da produção total de rejeitos no Brasil, e as previsões indicam um contínuo aumento dessa quantidade, acompanhando o crescimento na produção de minério de ferro e a exploração de depósitos de baixo teor (Silva; Viana; Cavalcante, 2012).

Paralelamente ao aumento na produção, a disposição dos rejeitos tornou-se uma questão crucial nos últimos anos. No Brasil, a maior parte dos rejeitos de minério de ferro é disposta na forma de polpa em barragens (FEAM, 2018). Os incidentes de rompimento ocorridos em 2015 e 2019 intensificaram as pressões do governo e da sociedade sobre as mineradoras em relação à geração e disposição dos rejeitos (Minas Gerais, 2019; Brasil, 2021; Brasil, 2023).

Nesse cenário, diversos estudos e iniciativas surgiram para explorar a possibilidade de reaproveitar o rejeito de minério de ferro, visando reduzir a quantidade de material descartado no meio ambiente. Carmignano (2021) aponta a possibilidade de integrar o rejeito como matéria-prima em vários insumos de construção civil, tais como tijolos, argamassa, concreto, cerâmicas, pigmentos e blocos de pavimentação. Algumas empresas, como a Vale e a Minerita, já possuem fábricas de produtos para construção civil produzidos a partir dos rejeitos gerados em suas usinas (ABM, 2020; Silveira, 2015).

Além do reaproveitamento na construção civil, estudos realizados nas últimas décadas têm investigado a possibilidade de reprocessar o rejeito de minério para recuperar o conteúdo metálico ainda presente, perdido devido a limitações tecnológicas dos equipamentos e dos processos utilizados nas usinas de beneficiamento. Esse reprocessamento utiliza os métodos de cominuição, classificação e concentração aplicados ao minério de ferro. Assim como no caso do minério bruto, o tipo de concentração e os parâmetros empregados para a concentração do rejeito dependem das suas propriedades químicas, físicas e mineralógicas. De acordo com Carmignano *et al.* (2021), essas propriedades estão intrinsicamente ligadas às características do minério original processado, bem como à natureza e eficiência do processo inicial.

Gomes e Papini (2022) empregaram testes de concentração em rejeitos de minério de ferro, utilizando a separação magnética com base na diferença de susceptibilidade magnética entre os óxidos de ferro e os minerais de ganga presentes. Os autores variaram a intensidade de campo magnético em 7000, 9000 e 11000 Gauss, e obtiveram um concentrado com 66,83% de ferro e 1,74% de sílica. Já Rocha (2008) aplicou a flotação catiônica reversa para separar os minerais de ganga do rejeito, utilizando dosagens de 25,30 e 55 g/t de coletor amina. O autor conseguiu produzir concentrados com 20% de recuperação mássica e menos de 1% de sílica.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade de reprocessar um rejeito de minério de ferro proveniente do oeste do continente africano, utilizando duas rotas de concentração: separação magnética e flotação catiônica reversa. A meta foi alcançar um concentrado final com uma recuperação mássica mínima de 15%, teor de ferro de 62%, e máximo de 5% de impurezas. Os resultados pretendem contribuir para aumentar o potencial de aproveitamento do conteúdo metálico de depósitos minerais, reduzindo a quantidade de rejeitos a ser disposta.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a viabilidade de reprocessar o rejeito de minério de ferro de uma mina do oeste da África, utilizando separação magnética e flotação, visando um concentrado com no mínimo, 15% de recuperação mássica, 62% de teor de ferro e máximo de 5% de teor de impurezas.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- a) realizar a caracterização física, química e mineralógica das três amostras de rejeito utilizadas no estudo;
- b) executar testes de separação magnética em escala de bancada, utilizando-se o equipamento Tube de Davis, variando a intensidade de campo magnético em 1700 e 4200 Gauss;
- c) realizar testes de separação magnética em escala piloto, utilizando separadores magnéticos de tambor de baixa e média intensidades de campo magnético, variando a intensidade de campo em 1700 e 7000 Gauss;
- d) realizar testes de flotação em escala de bancada, variando a dosagem de coletor amina Flotigam EDA utilizada em 100, 300 e 500 g/t;
- e) avaliar a viabilidade de recircular parte do rejeito dentro do fluxograma original do processo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão literária dos temas relevantes para este trabalho.

3.1 Minério de ferro

O minério de ferro destaca-se como uma das commodities minerais mais importantes da atualidade, tratando-se da fonte primária de ferro metálico para produção de aço na siderurgia (Lu, 2015). Estima-se que as reservas de minério de ferro globais cheguem a 180 bilhões de toneladas, contendo 85 bilhões de toneladas de ferro. Atualmente, Austrália e Brasil são os maiores produtores e exportadores de minério de ferro, seguidos por China e Índia (USGS, 2023). O aumento da industrialização e da demanda por bens de consumo impulsionou o crescimento na produção de aço nas últimas duas décadas, o que levou a uma grande expansão na produção de minério de ferro que passou de 1,043 bilhões de toneladas em 2001 para 2,6 bilhões de toneladas em 2022 (Lu, 2015; USGS, 2023).

Considera-se aqui que o termo “minério” é uma definição econômica, e não geológica, por ser controlada por questões tecnológicas, políticas e de infraestrutura (Evans, 1987 *apud* Andrade, 2018). Desta forma, entende-se por minério de ferro um depósito ou mineralização ferrífera cujo conteúdo metálico está sendo ou poderá vir a ser explorado (Andrade, 2018; Lu, 2015). Segundo Carvalho *et al.* (2014), geologicamente, os depósitos de ferro podem ser classificados de acordo com seu tipo de fenômeno de formação (sedimentar, soluções hidrotermais, atividades vulcânicas e metamorfismo). Os depósitos mais importantes são aqueles formados por sedimentação acamadada, uma vez que dão origem às formações ferríferas bandadas (BIF's), maiores reservas de ferro do mundo. As BIF's são caracterizadas por serem rochas laminadas constituídas por bandas de minerais portadores de ferro (especialmente magnetita e hematita) e sílica (quartzo).

Quarto elemento mais abundante na crosta terrestre, o ferro está presente em uma alta gama de minerais. Entretanto, apenas alguns desses minerais podem ser explorados de maneira economicamente viável para a extração de ferro. Essa viabilidade depende tanto do conteúdo de ferro do mineral quanto da distribuição do

mineral na crosta terrestre (se há concentrações grandes o suficiente do mineral para compor um depósito). Atualmente, apenas óxidos e hidróxidos representam fontes economicamente viáveis para a exploração de ferro (Carvalho *et al*, 2014).

A Tabela 1 apresenta os principais minerais portadores de ferro atualmente explorados (minerais minério), mostrando sua classe, fórmula química e conteúdo de ferro. A Tabela também apresenta a classe e fórmula química dos principais minerais de ganga (minerais sem aproveitamento econômico) associados.

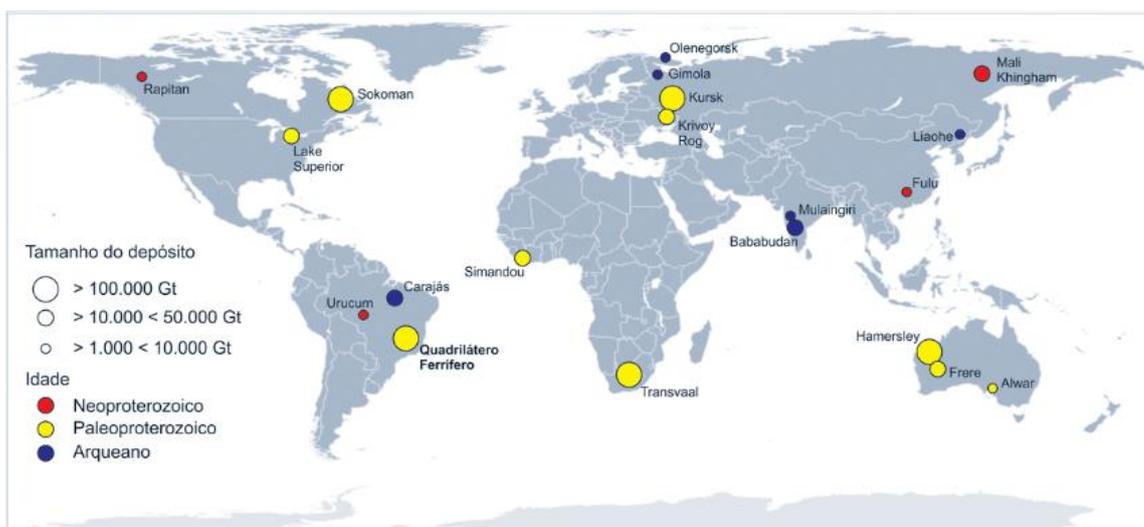
Tabela 1 – Classe e fórmula química dos principais minerais minério e minerais de ganga de depósitos de minério de ferro

Mineral	Classe	Fórmula química	Conteúdo de ferro
Minerais minério			
Hematita	Óxido	Fe_2O_3	69,9%
Magnetita	Óxido	Fe_3O_4	72,4%
Goethita	Óxido	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	62,9%
Limonita	Óxido	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	59,8%
Minerais de ganga			
Quartzo	Silicato	SiO_2	-
Caulinita	Filossilicato	$\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$	-
Gibsitita	Hidróxido	$\text{Al}(\text{OH})_3$	-

Fonte: Adaptado de Carvalho *et al* (2014) e Aguiar (2013)

A Figura 1 apresenta a localização dos principais depósitos de minério de ferro no mundo.

Figura 1 - Localização dos principais depósitos de minério de ferro do mundo



Fonte: Caxito e Dias, 2018

Segundo Caxito e Dias (2018), a exploração de minério de ferro corresponde à principal atividade mineral do Brasil, representando 61,7% do total de substâncias metálicas comercializadas no Brasil. Em 2021, estima-se que a produção comercializada de minério de ferro (bruto e beneficiado) rendeu mais de 250 bilhões de reais, totalizando 8,7 bilhões de reais em arrecadação de CFEM (compensação financeira por exploração mineração) para a União (ANM, 2023).

3.1.1 Beneficiamento do minério de ferro

A Norma Reguladora da Mineração nº18 (Brasil, 2001) define o beneficiamento de minérios como sendo o conjunto de operações que visam ajustar o tamanho das partículas e concentrar ou purificar o minério por meio de métodos químicos e físicos, sem modificar a composição química dos minerais.

Considerando que 98% de toda produção de ferro mundial é utilizada na siderurgia (USGS, 2023), as operações do beneficiamento mineral visam principalmente preparar o minério química e granulometricamente para sua utilização nos altos fornos.

Segundo Bennet *apud* Pascoal *et al.* (2017), a qualidade do minério de ferro, que determinará o tipo de beneficiamento ao qual ele deve ser submetido, pode ser dividida em três subtipos: química, correspondendo à composição do minério, ou seja,

teor de ferro e teor de impurezas; física, em especial o tamanho das partículas; e metalúrgica, que são características que afetam a produtividade durante o processo metalúrgico.

Luz e Lins. (2010) dividem as operações de beneficiamento do *run-of-mine* (ROM, minério bruto) em quatro grandes grupos:

- a) cominuição (britagem e moagem): prática de redução de tamanho dos minerais, visando adequar a granulometria para venda ou liberar as espécies minerais para as etapas subsequentes, garantindo que cada partícula apresente apenas uma espécie mineralógica;
- b) peneiramento e classificação: separação por tamanho das partículas em duas ou mais frações com granulometrias distintas. Nos circuitos de cominuição, a separação por tamanho pode ser utilizada para evitar cominuição excessiva;
- c) concentração: consiste em separar o mineral minério do mineral de ganga, previamente liberados na cominuição. Para tanto, é necessário existirem diferenças de propriedades entre as espécies minerais presentes no minério. Propriedades diferenciadoras, como susceptibilidade magnética (usada na separação magnética), densidade (aplicada em concentração gravítica), e propriedades superficiais como hidrofobicidade e hidrofiliabilidade (para operação de flotação), são utilizadas para direcionar as espécies minerais durante a concentração. O processo resulta em dois tipos de produtos: concentrados (com teor mais alto do mineral de interesse) e rejeitos (parte que concentra os minerais indesejados);
- d) desaguamento, secagem e disposição: como grande parte das operações ocorrem a úmido, é frequentemente necessário remover parte da água usada nos processos por meio de desaguamento e secagem, para preparar os produtos para transporte e venda (no caso dos concentrados) ou disposição, (no caso dos rejeitos). Os rejeitos gerados são, geralmente, dispostos no ambiente, muitas vezes na forma de barragens ou pilhas.

O tipo e a forma de beneficiamento necessários para que o minério atinja as especificações de teor mínimo de ferro e teor máximo de impurezas exigidos pela indústria dependem das características químicas, físicas e mineralógicas de cada minério. Um minério de baixo teor de impurezas, como aquele cujo teor de ferro já atende às especificações do comprador, requer apenas processos de cominuição e peneiramento para ajuste de granulometria (Souza, 2010).

Entretanto, segundo Fernández-González, Piñuela-Noval e Verdeja (2017), o aumento anual do consumo e produção mundiais de ferro levou no esgotamento da maior parte dos depósitos minerais de alto teor, exceto por alguns depósitos remanescentes no Brasil e na Austrália (Ormond, 2021). Dessa forma, a maioria dos depósitos restantes possui teores médios a baixos, exigindo operações de concentração para a remoção de minerais de ganga.

Além disso, ainda segundo Fernández-González, Piñuela-Noval e Verdeja (2017), a necessidade de liberar as partículas de mineral minério das partículas de ganga durante a cominuição levou à produção de concentrados com partículas mais finas.

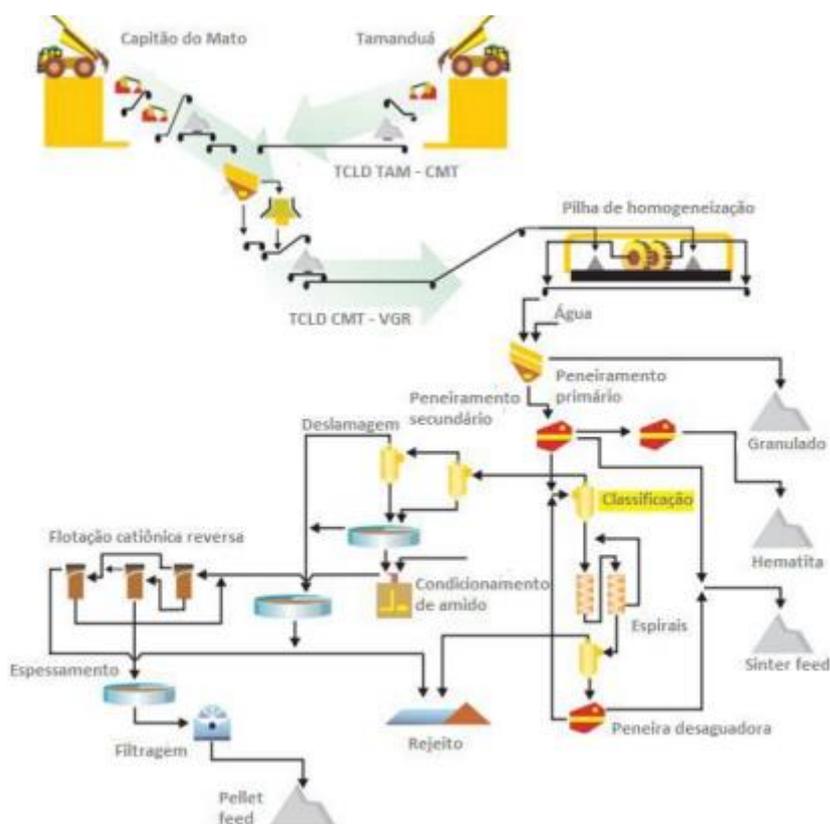
Assim sendo, de acordo com Omachi (2015), o *run of mine*, após o beneficiamento, é dividido em três os produtos distintos com base em sua granulometria:

- a) granulado ou *lump ore* (32 mm – 6mm): o produto granulado é o de maior granulometria, devendo apresentar alto teor de ferro e baixo teor de contaminantes. Devido às suas características, pode ser diretamente introduzido no alto-forno;
- b) *sinter feed* (6 mm – 0,15 mm): produto de granulometria intermediária, utilizado na sinterização para produção do sinter antes de ser introduzido ao alto-forno. Atualmente, é o produto mais consumido nos processos siderúrgicos;
- c) *pellet feed* (-0,15 mm): fração mais fina do minério de ferro que, por muito tempo foi descartada com rejeito devido à falta de tecnologia capaz de concentrá-la. Com os avanços no processo de beneficiamento, essa fração, que possui alto teor de ferro pode ser concentrada e serve como matéria-prima para a produção de pelotas.

As pelotas são obtidas pela aglomeração dos finos, possibilitando a sua utilização em altos-fornos e processos de redução direta.

A Figura 2 representa um fluxograma típico para a rota de beneficiamento de um minério de ferro. Nesse esquema, está representado de forma simplificada o beneficiamento do minério da mina de Vargem Grande, da mineradora Vale. É possível observar as operações unitárias do beneficiamento mineral e os três produtos citados acima.

Figura 2 - Fluxograma de beneficiamento do minério de ferro da mina de Vargem Grande



Fonte: VALE, 2012 *apud* Oliveira, 2018

3.2 Rejeitos de Minério de ferro

Araujo (2006) e Wolff (2009) definem rejeitos de mineração como resíduos resultantes do processo de beneficiamento do minério, gerados quando o elemento de interesse econômico é extraído do minério bruto. Teoricamente, o rejeito possui baixo teor do mineral de interesse e alto teor de impurezas, não possuindo valor

econômico imediato, devendo ser disposto ou descartado. No processamento do minério de ferro normalmente a principal impureza presente no rejeito é a sílica, considerando que o quartzo é o principal mineral de ganga do minério de ferro.

Ainda segundo Araujo (2006) e Wolff (2009), os rejeitos de minério de ferro podem ser dispostos de forma sólida ou em polpa, sendo o segundo caso mais comum no Brasil. Entretanto, antes do descarte, a polpa passa por alguns processos para recuperar parte da água contida, possibilitando sua recirculação.

Boskov (2008) *apud* Silva e Paiva (2020) reporta que, em média, para cada tonelada de concentrado de minério de ferro produzida, meia tonelada de rejeito é gerada, resultando em uma razão média entre produto e rejeito de 2:1. Isso contribui para uma produção anual global de rejeito de ferro na casa dos bilhões de toneladas. Carmignano *et al.* (2021) estimam que a Austrália é o país com a maior geração de rejeitos de minério de ferro, com 632 milhões de toneladas anualmente. O Brasil é o segundo maior gerador de rejeitos. Um estudo do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada/IPEA (Silva; Viana; Cavalcante, 2012) avaliou a geração anual de rejeitos no Brasil entre 1996 e 2005, projetando-a também para o período entre 2010 e 2030. O estudo indicou que o minério de ferro foi e continuará sendo o maior contribuinte para a geração de rejeitos no Brasil, correspondendo a 30 a 40% da geração total anual. A quantidade de rejeitos gerada aumentou de 86,3 milhões de toneladas em 1996 para 95,6 milhões de toneladas em 2005. As estimativas para 2022 e 2023 foram, respectivamente, 244,5 e 246,7 milhões de toneladas, projetando-se 265,5 milhões de toneladas em 2030. A quantidade acumulada de rejeitos de minério de ferro gerados no Brasil entre 2000 e 2014 foi de 1,6 bilhões de toneladas (Moraes *et al.*, 2017).

Carmignano *et al.* (2021) afirmaram que as propriedades químicas, físicas e mineralógicas do rejeito de minério de ferro gerado dependem da mineralogia do minério bruto processado, da natureza dos processos utilizados nos minerais e da eficiência do processamento. Por exemplo, minérios de ferro com altos teores de argilominerais tendem a gerar rejeitos de granulometria mais fina. Rejeitos finos são comumente gerados em processos de beneficiamento que envolvam deslamagem, enquanto rejeitos oriundos de flotação geralmente são mais grosseiros, com altos

teores de sílica e baixas quantidades de hematita e goethita. A Tabela 2 apresenta um compilado de diferentes rejeitos do processamento de minério de ferro.

Tabela 2 - Caracterização do rejeito de minério de ferro de diferentes minas

Mina/ localização	Processo original	Composição química (%)					Principais fases mineraiis	Granulometria		Fonte
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn		d50 (µm)	d80 (µm)	
Complexo Serra Azul/ Quadrilátero Ferrífero (MG)	Jigagem	30,35	37,00	2,80	0,178	0,03	Quartzo, hematita, goethita e magnetita	1800	4200	Dauce, 2017
Brucutu (VALE)/Quadrilátero ferrífero (MG)	Rejeito total (vários processos)	44,8	-	3,1	0,16	0,2	Hematita, goethita, caulinita, quartzo, moscovita, Gibbsita	9	18	Wolff, 2009
Carajás (VALE)/ Paraupébas (PA)	Rejeito total (vários processos)	64,0	-	0,8	0,081	0,9	Hematita, Goethita, Gibbsita	4	12	Wolff, 2009
Água Limpa (VALE)/Rio Piracicaba (MG)	Concentração gravítica (espirais)	20,64	69,48	0,30	0,017	-	-	125	166	São José; Oliveira; Pereira, 2016
Casa de Pedra (CSN)/Congonhas (MG)	Ciclonagem e flotação (caracterização apenas das lamas)	38,23	37,05	4,36	0,071	0,12	Hematita, quartzo e silicatos	2,8	9	Rocha, 2008

Mina/ localização	Processo original	Composição química (%)					Principais fases mineraiis	Granulometria		Fonte
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn		d50 (µm)	d80 (µm)	
Alegria (Samarco)/Mariana (MG)	Flotação Mecânica	11,01	83,68	0,21	0,014	-	Quartzo, hematita, goethita e caolinita	63	116	Vieira, 2008
Córrego do Feijão (VALE)/Brumadinho (MG)	Ciclonagem e separação magnética	48,08	20,58	3,16	0,098	0,89	Hematita, martita, magnetita, goethita, quartzo, gibbsita e caolinita	-	-	Gomes, 2009
Mineração USIMINAS/Serra Azul (MG)	Jigagem e ciclonagem	44,30	30,93	2,64	0,042	0,046	Quartzo e hematita	50	107	Rocha, 2017
Mina de Conceição (VALE)/Conceição do Mato Dentro (MG)	Rejeito total (vários processos)	44,30	-	1,0	0,11	1,9	Hematita, goethita, caulinita, quartzo, talco, moscovita	14	30	Wolff, 2009

É possível notar a grande variação existente para os rejeitos de minério de ferro de minas brasileiras, especialmente considerando-se granulometria e teor de ferro e sílica.

3.2.1 Disposição de rejeitos e aspectos ambientais e legais

A maior parte dos rejeitos de minério de ferro no Brasil atualmente está disposta em barragens, sendo a maior parte delas no estado de Minas Gerais (FEAM, 2018; Moraes *et al.*, 2017). Com o esgotamento de depósitos de alto teor e a necessidade cada vez maior de se tratar depósitos com baixo teor de ferro, a quantidade de rejeito gerado na mineração de ferro tende a aumentar (Fernández-González; Piñuela-Noval; Verdeja. 2017; Silva; Viana; Cavalcante, 2012). Isso amplia a preocupação ambiental relacionada à disposição desses rejeitos, especialmente no que diz respeito às barragens de rejeito.

Atualmente, estima-se que 99,99% dos rejeitos gerados na mineração possuem destinação dentro da própria atividade, sendo a grande maioria (94,58%) destinada a barragens de rejeito (FEAM, 2018). Em 2017, o Brasil possuía 661 barragens de rejeitos provenientes da mineração, sendo 48% delas localizadas no estado de Minas Gerais. Dessas, 249 eram barragens de rejeito de minério de ferro (Moraes *et al.*, 2017).

Além de exigirem extensas áreas para a disposição, o que resulta em desmatamento, danos à fauna e flora locais, e alterações na paisagem, as barragens de rejeito muitas vezes apresentam riscos de segurança e ambientais para as áreas circunvizinhas. O Relatório de Segurança de Barragens de 2022 (ANA, 2022) indica que atualmente há o registro de 512 barragens destinadas à acumulação de resíduos e rejeitos. Dentre essas, 75% possuem volume pequeno ou muito pequeno (<5 hm³), 14% são de médio porte (até 25 hm³) e 7% são consideradas grandes ou muito grandes (maiores que 25 hm³). Dessas barragens, 48 apresentam um DPA (Dano Potencial Associado) médio ou alto, bem como uma CRI (Categoria de Risco) alta.

Segundo Reis *et al.* (2020), entre 1910 e 2019, ocorreram mundialmente 250 eventos de rompimento de barragens de rejeito, abrangendo todos os continentes. As décadas com mais casos foram 1960, 1970 e 1980. Mesmo com avanços na

legislação e nas técnicas de construção civil, ocorreram 61 rompimentos nas últimas três décadas em todo o mundo.

No Brasil, os rompimentos das barragens de Fundão e de Córrego do Feijão ocorridos na última década foram particularmente notórios. A barragem de Fundão, da mineradora Samarco S.A, rompeu em 2015, despejando 60 bilhões de litros de rejeito e destruindo os distritos Bento Rodrigues e Paracatu de Baixo, distritos de Mariana, resultando na perda de 19 vidas. Em 2019, a barragem da mina Córrego do Feijão, da mineradora Vale, rompeu em Brumadinho, resultando na morte de 247 pessoas, além de 23 desaparecidos. Ambos os acidentes causaram danos ambientais significativos, sendo que o rompimento da Barragem de Fundão percorreu mais de 600 km da bacia do rio Doce até o oceano Atlântico, afetou o fornecimento de água potável em várias cidades de Minas Gerais e Espírito Santo, e impactou diversas áreas de cultivo e outras atividades produtivas. Já o rompimento da Barragem de Córrego do Feijão despejou 12 milhões de metros cúbicos de rejeito na bacia do rio Paraopeba (Reis *et al.*, 2020).

Esses eventos destacaram a problemática dos rejeitos da mineração e os impactos ambientais e sociais associados à sua disposição. A legislação que regula o setor tornou-se objeto de análise em diversos âmbitos, visando encontrar mudanças e melhorias que evitem incidentes futuros (Moraes *et al.*, 2017). A Tabela 3 apresenta um compilado dos marcos regulatórios relacionados ao tema de rejeitos de mineração.

Tabela 3 - Marcos da legislação brasileira relacionada a rejeitos de mineração

Legislação	Ano	Descrição
Portaria DNPM nº 237	2001	Aceita as NRM (Normas Reguladoras da Mineração)
Resolução do CONAMA nº 303	2002	Estabelece diretrizes e limites para parâmetros, definições e áreas consideradas como Preservação Permanente.
Deliberação Normativa COPAM nº 62, alterada pela COPAM nº 87	2002/2005	Estabelecem diretrizes referentes aos critérios técnicos e ambientais de categorização de barragens de contenção de rejeitos, resíduos e reservatórios de água.
Deliberação Normativa COPAM nº 124	2008	Complementa a Deliberação Normativa COPAM no 87, estabelecendo que o empreendedor deve apresentar uma Declaração de Condição de Estabilidade ao COPAM

Legislação	Ano	Descrição
Decreto nº 7.404	2010	Institui o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa.
Portaria DNPM nº 416	2012	Estabelece a criação do Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e define as diretrizes relacionadas ao Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança, bem como Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração. (Revogada pela Portaria DNPM nº 70.389).
Resolução DNPM nº 144	2012	Define as diretrizes para a implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens.
Resolução CNRH nº 143	2012	Define parâmetros para a categorização de barragens, considerando critérios como risco, potencial de dano e volume.
Portaria DNPM nº 526	2013	Determina a frequência de atualização e revisão, os requisitos para a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM). (Revogada pela Portaria DNPM nº 70.389).
Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2372	2016	Define as orientações para a condução da auditoria extraordinária de segurança de barragens de rejeito, bem como para a emissão da Declaração Extraordinária de Condição de Estabilidade correspondente.
Decreto nº 46.933	2016	Estabelece a implementação da Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragem.
Portaria DNPM nº 14	2016	Determina o período limite para a apresentação do comprovante de entrega das cópias físicas do Plano de Ação de Emergência de Barragem de Mineração (PAEBM).
Portaria DNPM nº 70.389	2017	Institui o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e define a frequência de execução ou atualização, os requisitos para a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração.
Resolução conjunta SEMAD/FEAM nº 2.784 (Lei Nº23.291)	2019	Determina a descaracterização de todas as barragens de contenção de rejeitos e resíduos, alteadas pelo método a montante, provenientes de atividades minerárias, existentes em Minas Gerais e dá outras providências.
Resolução ANM nº85	2021	Estabelece as regras para o reaproveitamento de rejeitos, resíduos e estéreis da mineração.
Resolução ANM nº95, alterada pela Resolução ANM nº130	2022/2023	Consolida todos os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração

3.3 Alternativas para o reaproveitamento do rejeito de minério de ferro

No contexto atual, com um alto volume de rejeitos sendo produzidos e um constante aumento da legislação sobre o tema, se tornou prioridade para diversas empresas encontrar alternativas para o reaproveitamento dos mesmos. A possibilidade de reaproveitamento dos rejeitos, assim como a melhor aplicação dos mesmos, depende de diversos fatores, como as características químicas, físicas e mineralógicas, além das tecnologias disponíveis. A seguir, estão apresentadas algumas possíveis aplicações para o rejeito de minério de ferro.

3.3.1 Construção civil e infraestrutura

Ao longo dos anos, diversos estudos foram desenvolvidos sobre a aplicação dos rejeitos de minério de ferro na construção civil e infraestrutura de cidades, podendo ser utilizados em diferentes materiais.

Segundo Carmignano *et al.* (2021), existem duas formas de aproveitar o rejeito de minério de ferro. No primeiro tipo de aplicação, os minerais de óxido de ferro são separados da sílica do rejeito por meio de algum processo químico ou físico. Dessa forma, as duas frações geradas (uma rica em óxido de ferro e outra em sílica) podem ser utilizadas em diferentes aplicações. Os óxidos de ferro podem ser utilizados como pigmentos ou para o tratamento de água, enquanto a sílica pode ser matéria-prima para vidro, silício e silicatos. A segunda forma de aplicação consiste no uso direto do rejeito, sem separação prévia dos minerais presentes. Esta forma de aplicação será detalhada a seguir.

a) Tijolos

Os rejeitos de minério de ferro podem ser utilizados na construção de variados materiais, sendo fundamental a sua prévia caracterização para obter informações sobre suas propriedades físicas, químicas, mecânicas e possível toxicidade. Uma das aplicações consiste na confecção de tijolos para construção de prédios. Faria (2023) estudou a produção de tijolos prensados a partir do rejeito oriundo da barragem de Fundão (MG). Após caracterização química, física e microestrutural do rejeito, foram

realizados estudos sobre as porcentagens de rejeito que podem ser utilizadas na produção dos tijolos prensados. A pesquisa concluiu que é possível produzir tijolos a partir de rejeito de minério de ferro utilizando o processo de ativação alcalina, considerando as propriedades de resistência à compressão e absorção de água alcançadas. Mendes *et al* (2019) também conseguiram confeccionar um tijolo incorporando rejeito de minério de ferro com alto teor de sílica em sua confecção (29,1% em massa), alcançando índices de resistência em conformidade com normas internacionais.

b) Concreto e Argamassa

Outra aplicação possível do rejeito de minério de ferro é na fabricação de concreto e argamassa, podendo substituir total ou parcialmente os agregados finos presentes na mistura desses materiais. Embora a alta área específica e formato irregular das partículas possam ter efeitos negativos nas propriedades do concreto, estudos apontam que as propriedades mecânicas e a durabilidade (resistência ao desgaste, degradação ou deterioração) do rejeito possam influenciar positivamente na trabalhabilidade, resistência e propriedades mecânicas do concreto, quando adicionado nas proporções corretas (Zhao *et al*, 2021).

Zhao, Fan e Sun (2014) estudaram a adição de rejeitos de minério de ferro a concretos de alta performance (*ultra-high performance concrete*, ou UHPC) e concluíram que, ao substituir não mais que 40% dos agregados finos naturais, o comportamento mecânico da mistura era comparável ao da mistura sem a presença de rejeitos.

Fontes (2013) avaliou a possibilidade de utilizar rejeito fino de uma barragem com alto teor de ferro em argamassas de revestimento e assentamento. As argamassas elaboradas utilizando rejeito em conjunto com agregados naturais demonstraram uma trabalhabilidade equivalente, embora aquelas com rejeito como agregado exibissem teores mais elevados de água, menor incorporação de ar e maiores densidades de massa tanto no estado fresco quanto endurecido. Essas características podem ser atribuídas à alta densidade do resíduo, fator capaz de influenciar as propriedades da argamassa. Vale ressaltar que, em termos de desempenho mecânico, as argamassas compostas com resíduo apresentaram

resultados superiores em comparação às produzidas com agregados naturais, especialmente após 28 dias de cura. Em testes substituindo (total ou parcialmente) a cal na mistura de argamassa por rejeito, notou-se que uma substituição de 10% da cal por rejeito contribuiu para elevar de forma considerável a resistência mecânica da argamassa.

c) Pavimentação

Quanto à pavimentação, Silva *et al.* (2023) e Guerra (2014) estudaram a utilização de rejeitos de minério de ferro para fabricação de blocos de concreto intertravados (*pavers*). Silva *et al.* (2023) utilizaram rejeitos da mina do Andrade para substituir total ou parcialmente a areia dos blocos. O estudo concluiu que os rejeitos dessa mina possuem propriedades físicas similares aos agregados finos utilizados nos blocos de concreto, entretanto, os corpos de prova feitos com o rejeito não atingiram os necessários para sua utilização em pavimentação.

Guerra (2014) utilizou rejeito de minério de ferro na fração *pellet feed*, substituindo 5 e 10% da massa de cimento da mistura. Seus resultados mostraram desempenho inferior aos requisitos exigidos para pavimentação, embora os concretos com rejeito tenham apresentado maior resistência e absorção de água em comparação ao concreto de referência. Já Silva (2017) avaliou a utilização de rejeitos na composição de revestimentos rodoviários (concreto asfáltico). O estudo concluiu que os rejeitos de minério de ferro apresentam potencial para serem utilizados em revestimentos asfálticos, possibilitando uma redução do passivo ambiental gerado por esse resíduo e diminuindo o consumo de agregados convencionais utilizados em misturas asfálticas.

d) Tintas

Galvão *et al.* (2018) utilizaram um rejeito rico em ferro como pigmento e testaram quatro tipos diferentes de aglutinantes para produção de tintas sustentáveis. Os resultados demonstraram a obtenção de diversas tonalidades de marrom e vermelho, além de texturas distintas, e com preços consideravelmente inferiores em

comparação com as tintas tradicionais. As tintas produzidas são indicadas para uso em ambientes internos, não sujeitos a intempéries.

Pereira e Bernardin (2012) produziram um corante para esmaltes cerâmicos. O estudo utilizou rejeitos provenientes de lamas para conferir cor a bases de esmaltes brancos, transparente e foscos. O resultado foi a obtenção de um esmalte avermelhado, semelhante à cor de pinhão, adequado para a indústria de telhados. Esse efeito ocorreu especialmente quando o rejeito foi adicionado a esmaltes brancos e foscos.

e) Cerâmicas

Segundo Carmignano (2021) e Silva (2014), o tamanho pequeno e formato arredondado das partículas de alguns rejeitos de minério de ferro, especialmente aqueles constituídos por silicatos com alto teor de sílica e alumina e baixo teor de ferro, possibilita seu uso na indústria de cerâmicas. Isso é possível pois a argila comumente usada como matéria-prima para cerâmicas é constituída de alumino silicatos hidratados com altos teores de sílica e alumínio, com frequência possuindo alguma contaminação de óxido de ferro, apresentando granulometria fina. Dessa, forma, como as propriedades de ambos os materiais são semelhantes, torna-se viável a troca de parte da argila por rejeito. Silva (2014) avaliou o potencial do uso de rejeitos na obtenção de cerâmicas, substituindo até 5% em massa da argila por rejeito. Os resultados mostraram que adição de resíduos à massa cerâmica propiciou um aumento na resistência à flexão em comparação com a cerâmica sem adição de resíduo, além de reduzir a absorção de água e aumentar a porosidade.

f) Casas modelo construídas a partir de rejeitos

Em 2020, uma pesquisa da UFMG em parceria com a Gerdau utilizou rejeitos de mineração para construir uma casa modelo (G1, 2020). A casa possuía 48 metros quadrados, e os insumos das paredes, teto, piso e da bancada da cozinha foram todos fabricados com rejeitos de minério de ferro, que também foram utilizados para produzir a argamassa utilizada. A construção utilizou 20 toneladas de rejeito. Já em 2015, outra pesquisa da UFMG, desta vez em parceria com a Samarco, construiu

uma casa modelo com 46 metros quadrados utilizando rejeitos e estéreis da mineração de ferro. O rejeito foi utilizado para produzir a areia, blocos, vigas, pedras e cimento que foram empregados na construção da casa (FAPESP, 2016). A Figura 3.a apresenta a casa construída com rejeitos da Gerdau, já a Figura 3.b mostra a casa construída com rejeitos da Samarco.

Figura 3 - Casas modelo construídas a partir de rejeitos de minério de ferro



Legenda: a) Casa construída com rejeitos da Gerdau e b) Casa construída com rejeitos da Samarco

Fonte: G1 (2020); FAPESP (2016)

Em 2020, a Vale inaugurou, em parceria com o CEFET-MG, a Fábrica de Blocos do Pico, uma fábrica piloto que fabrica produtos para construção civil a partir de rejeitos da mineração. A expectativa é que a fábrica utilize cerca de 30 mil toneladas de rejeito anualmente para produção de 3,8 milhões de produtos pré-moldados para construção civil, como pisos intertravados, blocos de concreto estruturais, blocos de vedação, placas de concreto, manilhas, blocos de vedação, entre outros (ABM, 2020).

Em 2011, a Minerita fundou, na cidade de Itatiaçu (MG), a empresa Blocoita, uma planta de fabricação peças pré-moldadas em concreto, utilizando a sílica (areia) proveniente da rota de produção do sinter feed da mineradora. Segundo Silveira (2015), a empresa produz anualmente 3 milhões de blocos de concreto e 5 milhões de peças intertravadas para pavimentação, o que recupera anualmente 85 mil toneladas de rejeito que seria destinado a barragens.

3.3.2 Reprocessamento de rejeito através de rotas de concentração

Outra alternativa que vem sendo estudada para a diminuição de rejeitos a serem dispostos e o melhor aproveitamento dos recursos naturais é o reprocessamento dos mesmos em plantas de beneficiamento, utilizando métodos de concentração tradicionais como flotação, separação magnética e concentração gravítica. a fim de recuperar o metal previamente perdido. O avanço das tecnologias no setor minerário possibilitou a recuperação de materiais de pior qualidade, (finos e com baixo teor de ferro e alto teor de impurezas), o que abre as portas para a viabilidade de se recuperar o ferro que foi/seria perdido para o rejeito por conta de limitações tecnológicas. São apresentados a seguir os métodos de concentração separação magnética e flotação, acompanhados de exemplos de estudos da utilização destes métodos para reprocessar rejeitos de minério de ferro de diferentes origens, buscando produzir a partir deles um concentrado com alto teor de ferro e baixo teor de impurezas.

3.3.2.1 Separação Magnética

A separação magnética é um método de concentração de minérios que se baseia nas diferentes respostas das espécies minerais à ação de um campo magnético, baseando-se na propriedade de susceptibilidade magnética (Sampaio *et al.*, 2018). Segundo Chaves e Chaves Filho (2013) *apud* Mendes *et al* (2021), o campo magnético é uma região influenciada pela forma magnética exercida por um corpo, podendo este ser um ímã natural ou previamente magnetizado. Visualmente, pode ser visualizado como linhas que indicam a direção de atração ou repulsão desse corpo.

Segundo Wills e Napier-Munn (2006), todos os materiais sofrem algum tipo de efeito quando submetidos a um campo magnético, embora em algumas substâncias o efeito seja tão diminuto que não pode ser percebido. De acordo com o comportamento desses minerais diante da ação de um campo magnético, é possível classifica-los nos seguintes grupos:

- a) diamagnéticos: são minerais repelidos pelas linhas de força do campo magnético até atingirem um ponto onde a intensidade do

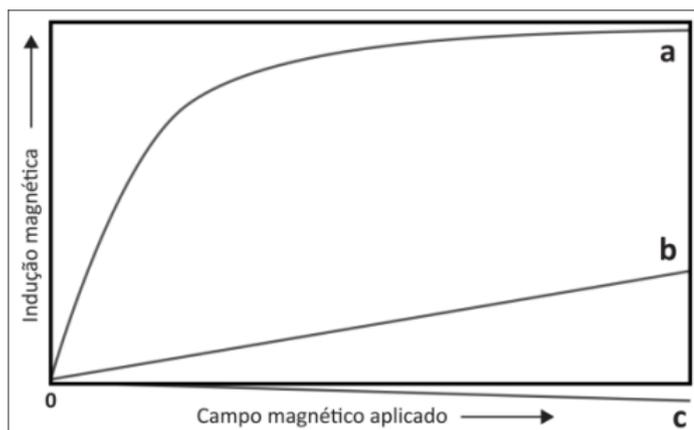
campo é menor. Um exemplo dessa classe de minerais é o quartzo, e minerais dessa classe não podem ser concentrados magneticamente;

- b) paramagnéticos: são minerais que apresentam uma fraca atração pelo campo magnético, movendo-se em direção a locais de maior intensidade de campo. Necessitam de um campo de alta intensidade para serem concentrados. Como exemplo dessa classe, tem-se a hematita;
- c) ferromagnéticos: Trata-se de uma categoria especial de paramagnetismo. Os minerais ferromagnéticos exibem uma elevada susceptibilidade magnética, sendo fortemente atraídos pelo campo magnético e retendo algum magnetismo mesmo após serem removidos do campo. Esses minerais podem ser concentrados com campos de baixa intensidade, e o exemplo mais conhecido dessa classe é a magnetita.

De acordo com Mihalk *apud* Sampaio *et al* (2018), a separação magnética dos minerais é baseada em dois aspectos fundamentais. O primeiro diz respeito à maneira como as partículas de minerais distintos se comportam a serem expostas ao mesmo campo magnético. Com base em sua susceptibilidade magnética, as partículas podem ser atraídas ou repelidas pelo campo. A Figura 4 ilustra a resposta dos três grupos de minerais à intensidade campo magnético aplicada.

Observa-se que os minerais ferromagnéticos respondem rápido e apresentam alta indução a campos magnéticos de baixa intensidade, atingido um ponto de saturação. Neste ponto, o material atinge seu limite máximo de magnetização em resposta a um campo magnético externo. Em outras palavras, não importa o quanto o campo magnético externo seja aumentado, a magnetização do material permanece constante (Wills e Napier-Munn, 2006). Para os minerais paramagnéticos, a indução é menos acentuada, sendo necessárias maiores intensidades de campo para alcançar que maiores valores de indução sejam alcançados. A curva c, referente aos minerais diamagnéticos, apresenta valores negativos de indução à medida que a intensidade do campo aumenta, demonstrando a repulsão desses minerais em relação ao campo magnético.

Figura 4 - Indução magnética dos diferentes minerais em função do campo magnético aplicado



Legenda: a) minerais ferromagnéticos; b) minerais paramagnéticos e c) minerais diamagnéticos

Fonte: Sampaio et al, 2018

Com base na diferença de susceptibilidade magnética, a escolha da intensidade de campo na separação magnética desempenha um papel, tendo impactos significativos na eficácia da separação das partículas minerais. Baixas intensidades de campo podem ser usadas para concentrar minerais com alta susceptibilidade magnética, enquanto minerais paramagnéticos podem necessitar intensidades de campos maiores.

O segundo aspecto da separação magnética está relacionado à forma como as forças magnéticas atuam sobre as partículas. Para que seja possível a separação, é necessário que o campo magnético possua um gradiente de força. Quando um campo de fluxo uniforme é aplicado, a resultante das forças atuantes na partícula é nula, e ela não será atraída. É necessário, então, um campo convergente, que afunile as linhas de força e um ou mais pontos, gerando uma força atuante sobre o material, atraindo-o ou repelindo-o (Sampaio *et al.*, 2018; Wills e Napier-Munn, 2006).

De acordo com Mendes *et al.* (2021), os equipamentos de separação magnética podem ser agrupados quanto ao tipo de alimentação (a seco ou a úmido) e na intensidade de campo gerada (alta ou baixa intensidade). Também podem ser classificados quanto ao tipo de matriz utilizada. A seguir, são apresentados os dois equipamentos utilizados neste trabalho.

a) Tubo de Davis

O Tubo de Davis é um separador eletromagnético de bancada que consiste em um equipamento de bancada composto por um eletroímã capaz de gerar uma densidade de fluxo magnético de até 4200 Gauss. Este dispositivo é constituído por um tubo feito de vidro posicionado entre os polos do eletroímã a um ângulo variável, e um mecanismo de agitação acionado por um motor, que permite que o tubo se movimente para frente e para trás enquanto gira sobre os polos (Gonzaga, 2014).

De acordo com Dworzanowski (2012), o tubo de Davis tem o seguinte princípio de funcionamento: o material é alimentado em pequenas quantidades no tubo preenchido com água, e gravita em direção ao campo magnético produzido pelos ímãs. As partículas magnéticas ficam retidas entre os polos dos ímãs, enquanto as não magnéticas são transportadas até a extremidade do tubo, onde são descarregadas pelo fluxo de água. O movimento do tubo cria uma turbulência na água que auxilia na remoção das partículas não magnéticas.

As principais variáveis deste equipamento incluem a intensidade do campo magnético; ângulo de posicionamento do tubo entre os ímãs e a frequência de movimentos do tubo. A Figura 5 apresenta um Tubo Magnético de Davis.

Figura 5 - Tubo magnético de Davis



Fonte: Marques, 2013 *apud* Gonzaga, 2014

b) Separador Magnético de Tambor

Trata-se de um separador magnético via úmida, de baixa ou média intensidade e magnetização permanente. De acordo com Wills e Napier-Munn (2006) e Gonzaga (2014), o separador é constituído por um conjunto de ímãs permanentes, utilizando cerâmica ou ligas de terras raras, que mantêm sua intensidade de campo por tempo indefinido. Esse conjunto é montado dentro de um tambor magnético, se estendendo em um arco de aproximadamente 120° em seu interior.

A separação ocorre pelo princípio do “*pick-up*” (“apanhar”, em português). A polpa é alimentada por uma caixa de alimentação em uma das extremidades do equipamento e cai dentro do tanque do equipamento. As partículas magnéticas são atraídas pela força de atração gerada pelo tambor e ficam grudadas ao mesmo. O giro do tambor as leva então a uma zona sem ação do campo magnético, e elas são removidas por raspadores e água de lavagem e coletadas como a fração magnética. As partículas não magnéticas não são atraídas e não se prendem ao tambor, permanecendo dentro do tanque, onde são coletadas como a fração não magnética (Sampaio *et al.*, 2018; Wills e Napier-Munn, 2006).

As principais variáveis deste tipo de equipamento, de acordo com Gonzaga (2014), são a porcentagem de sólidos da alimentação; frequência de rotação do tambor e taxa de alimentação. O separador magnético de tambor apresenta intensidade de campo magnético fixa, sendo que o valor pode variar entre equipamentos e modelos. Existem, por exemplo, separadores de baixa intensidade de campo, com 1700 Gauss, e de média intensidade de campo, com 7000 Gauss. A Figura 6 apresenta um exemplo de separador magnético de tambor.

Figura 6 - Separador magnético de tambor em escala piloto



Fonte: Marques, 2013 *apud* Gonzaga, 2014

A seguir, são descritos alguns exemplos de aplicações de separação magnética para reprocessamento de rejeitos de minério de ferro.

Gomes e Papini (2022) conduziram um estudo focado no reprocessamento de um rejeito de minério de ferro originado de uma mina localizado no Quadrilátero Ferrífero, gerado em processos de concentração magnética e gravítica. A caracterização tecnológica da amostra revelou que o rejeito possuía d_{90} de 110 μm e uma composição química com 36,53% de Fe e 53,64% de sílica. Para efetuar a concentração do rejeito, foi adotada a separação magnética de alta intensidade, utilizando um separador magnética de carrossel tipo Jones. Os parâmetros variados foram a intensidade de campo magnético (7000, 9000 e 11000 Gauss), a abertura da matriz eletromagnética (1,0 e 1,5 mm) e a porcentagem de sólidos (30 e 50%). O melhor concentrado produzido possuía 66,83% de ferro e 1,74% de sílica. Esses resultados foram obtidos ao ajustar os seguintes parâmetros: 1,5mm de abertura da matriz, 7000 Gauss de intensidade de campo magnético e 30% de sólidos. As autoras concluíram que o processamento por separação magnética para este material poderia recuperar aproximadamente 50% do material presente na barragem.

São José, Oliveira e Pereira (2016) realizaram um estudo sobre a concentração de rejeitos por meio de separação magnética. O rejeito das espirais da mina de Água Limpa (Rio Piracicaba/MG) foi caracterizado com 20,64% de ferro e 69,48% de sílica, e d_{80} igual a 166 μm . Foi utilizado um concentrador magnético de laboratório, com abertura de matriz igual a 2,5 mm e intensidade de campo variando entre 3000 e 6000 Gauss. Foram utilizadas vazões de água de lavagem de 100, 150 e 200 mL/s. Foi possível produzir concentrados com uma média de 30% de recuperação mássica, 60% de teor de ferro e 5% de sílica. Além disso, os teores de ferro no rejeito baixaram de 20% para uma média de 3%.

Menezes (2020) reprocessou o rejeito da deslamagem da usina de beneficiamento da Serra do Sapo (Conceição do Mato Dentro/MG), que apresentava um d_{90} igual a 38 μm e 38,08% de ferro e 33,67% de sílica. O estudo comparou dois separadores: Separador Magnético de Alta Intensidade a Úmido (Minimag, da Gaustec) e Separador Magnético Vertical Pulsante de Alto Gradiente (SLON, da Outotec). Os testes foram realizados com e sem dispersão prévia. No Minimag, a

intensidade de campo magnético foi variada entre 14 mil e 16 mil Gauss, enquanto no SLON foram utilizadas as intensidades de 8000 e 10000 Gauss. Os melhores resultados foram obtidos para o separador magnético modelo SLON, gerando um concentrado com teor de ferro igual a 67,06% e 1,96% de sílica, com recuperação mássica e metalúrgica de 32,42% e 56,86%, respectivamente.

3.3.2.2 Flotação

De acordo com Baltar (2010), a flotação é a técnica mais versátil e eficiente de beneficiamento de minérios atualmente. Trata-se de um método físico-químico baseado nas propriedades de superfície das diferentes espécies minerais, mais especificamente a polaridades das mesmas. Os minerais com superfície polar possuem afinidade de interação com a água (também uma substância polar), e, portanto, são classificados como hidrofílicos. Já os minerais apolares não possuem afinidade de interação com a água e por sua vez têm preferência pelo ar, sendo classificados como hidrofóbicos.

a) *Princípios Básicos da Flotação*

O princípio básico da flotação consiste na dispersão de partículas liberadas do minério em um meio aquoso, onde são introduzidas bolhas de ar. As partículas hidrofóbicas aderem à superfície das bolhas de ar e são transportadas arrastadas à superfície e coletadas na camada de espuma que se formar. As partículas hidrofílicas permanecerão no meio aquoso e afundarão (Chaves; Filho; Braga, 2010).

Para que o processo de flotação seja eficaz, três etapas fundamentais do processo devem ocorrer: colisão entre partículas e bolhas de ar, ruptura do filme líquido entre partículas hidrofóbicas e bolhas de ar para adesão da partícula à bolha, e resistência do agregado partícula-bolha durante a ascensão até a superfície. Baltar (2010) explica essas etapas como três probabilidades, que juntas determinam a probabilidade de flotação. São elas: probabilidade de colisão (P_c), probabilidade de adesão (P_a) e probabilidade de transporte (P_t). Essas propriedades são influenciadas por, dentre outras coisas, o tamanho das bolhas de ar, o tamanho das partículas, o grau de hidrofobicidade das partículas e as condições hidrodinâmicas.

Segundo Rocha (2017), poucos são os minerais que possuem naturalmente superfície hidrofóbica (por exemplo, o carvão), sendo a grande maioria hidrofílica. Entretanto, é possível tornar minerais naturalmente hidrofóbicos em hidrofílicos e vice-versa, com a adição à polpa de reagentes capazes de alterar a condição superficial das partículas, permitindo seletividade no processo de flotação. De acordo com Bulatovic (2007) os reagentes podem ser classificados de acordo com a função que exercem na flotação.

Os coletores desempenham o papel de tornar seletivamente minerais hidrofílicos em hidrofóbicos, adsorvendo em sua superfície de forma a promover sua afinidade com o ar. Os depressores tornam hidrofílicos alguns minerais, ou reduzem a hidrofobização de outros, permitindo a seletividade dos coletores. Espumantes reduzem a tensão superficial da água, fortalecendo as bolhas e estabilizando a espuma para uma fixação eficaz de partículas hidrofóbicas. Ativadores atuam na superfície das partículas a serem hidrofobizadas, proporcionando condições para a interação com o coletor. Moduladores de pH regulam a acidez da polpa, influenciando a interação entre o coletor e o mineral desejado.

Após a inserção de cada reagente na polpa mineral, é necessário um período de condicionamento antes que outro reagente seja inserido ou antes da flotação propriamente dita. Isso permite que os reagentes entrem em contato com todas as partículas de interesse. A necessidade, o tipo, e a quantidade dos reagentes utilizados dependem das características do minério a ser concentrado.

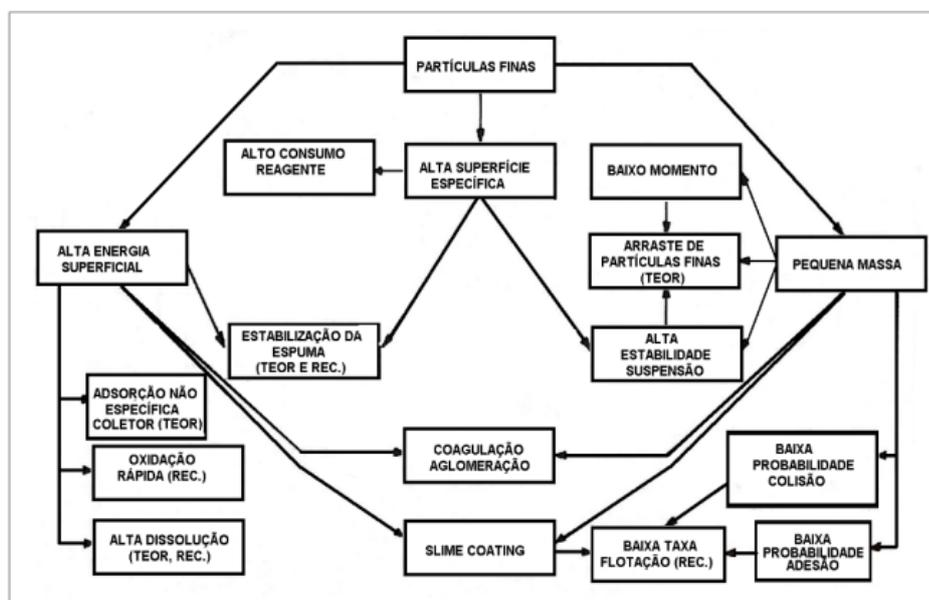
b) Flotação do Minério de Ferro

Segundo Rocha (2017), o método de flotação mais utilizado mundialmente para o minério de ferro atualmente é a flotação catiônica reversa, no qual os minerais de ganga são flotados, resultando no rejeito, enquanto os minerais minério permanecem na polpa, compondo o concentrado. No caso do minério de ferro, o quartzo é tornado hidrofóbico com a adição de coletores e, em seguida, é flotado. A flotação é chamada catiônica porque os coletores utilizados são catiônicos, ou seja, quando dissociados em solução aquosa dão origem a cátions, íons de carga positiva.

A faixa granulométrica ideal para flotação do minério de ferro é entre 10 e 150 μm . De acordo com Lima e Valadão (2008), partículas mais finas que 10 μm devem ser removidas antes da flotação por processos de deslamagem. Os principais

problemas associados com partículas ultrafinas (lamas) estão apresentados na Figura 7. Eles incluem o fato de lamas apresentarem uma pequena massa, resultando em baixo momento das partículas, o que causa baixa probabilidade de colisão e adesão às bolhas, e uma alta superfície específica, elevando o consumo de reagentes. Há também o fenômeno do *slime coating*, que ocorre quando partículas ultrafinas aderem à superfície de partículas mais grossas por meio de forças intermoleculares, prejudicando a ação dos reagentes e diminuindo o teor do concentrado (Rocha, 2017).

Figura 7 - Diagrama esquemático apresentando o efeito das propriedades de partículas finas na flotação



Fonte: Fuerstenau, 1980 *apud* Nogueira, 2019

Quanto às partículas muito grossas, um possível problema surge durante a ascensão do conjunto bolha-partícula. O tamanho e peso do grão pode levar à ruptura do conjunto e impedir o transporte do material.

Os principais reagentes utilizados na flotação catiônica do minério de ferro são o amido como depressor dos minerais de ferro e a anima como coletor do quartzo. O amido é um polissacarídeo que pode ser extraído de diferentes vegetais, como milho ou mandioca, e é utilizado como depressor na flotação do minério de ferro por

adsorver-se preferencialmente sobre superfície da hematita. No Brasil, o amido de milho é o mais utilizado como depressor (Rocha, 2017).

c) Coletor Amina

As aminas são compostos orgânicos, surfactantes com cabeça polar positiva derivados da amônia (NH_3). As aminas se caracterizam por um átomo de nitrogênio ligado a um ou mais radicais hidrocarboneto, e se formam quando ocorre a substituição de um ou mais átomos de hidrogênio da amônia por um número correspondente de cadeias hidrocarbônicas. Dessa forma as aminas podem ser classificadas em primárias, secundárias ou terciárias, dependendo do número de radicais hidrocarboneto ligados ao nitrogênio (respectivamente, um, dois, ou três radicais) (Bulatovic, 2007; Baltar, 2021).

Segundo Baltar (2021), as aminas mais comumente usadas em flotação são as aminas primárias. Estas, como os demais coletores, possuem molécula heteropolar, com uma parte orgânica (a cadeia hidrocarbônica) apolar, responsável por hidrofobizar a superfície da partícula mineral, e uma parte inorgânica (o NH_2) apolar responsável por solubilizar a amina em água e interagir com a superfície da partícula. As aminas primárias usadas na flotação podem possuir diferentes tamanhos e composições químicas da cadeia linear de hidrocarbonetos.

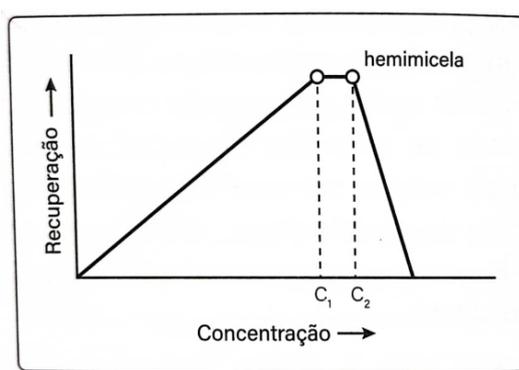
Com relação ao tamanho da cadeia carbônica, as aminas são classificadas de acordo com o número de carbonos na cadeia, podendo ser octilaminas (8 carbonos), decilaminas (10 carbonos), dodecilaminas (12 carbonos) e assim por diante. O tamanho da cadeia carbônica exerce uma influência direta no desempenho do coletor, uma vez que é responsável pela hidrofobicidade. Dessa forma, a intensidade da coleta aumenta com o tamanho da cadeia carbônica, entretanto a solubilidade da amina e a concentração micelar crítica (CMC) diminuem. A CMC é a concentração do surfactante a partir da qual começa a formação de micelas, que são estruturas globulares formadas por agregados de surfactantes (Baltar, 2021; Baltar, 2010).

Ainda segundo Baltar (2021), quanto à composição química, as aminas podem possuir cadeia hidrocarbônica homogênea (composta apenas por átomos de carbono e hidrogênio), como é o caso das aminas graxas, ou uma composição heterogênea, apresentando pelo menos um heteroátomo em sua cadeia.

A principal forma de adsorção da amina na superfície dos minerais é física, por meio de interação eletrostática entre a espécie catiônica (RNH_3^+) e os sítios negativos da superfície do mineral. Este é um fenômeno extremamente rápido e pouco seletivo, podendo ocorrer em qualquer superfície que possua sítios negativos.

De acordo com Baltar (2021), considerando a presença de sítios negativos disponíveis e a predominância da amina em forma iônica na polpa mineral, a recuperação aumenta com o aumento da dosagem de amina, devido ao aumento da hidrofobicidade, atingindo um ponto máximo conforme representado na Figura 8. Há, então, um intervalo de concentração para o qual a recuperação é máxima. Ao fim desse intervalo, a partir de uma certa concentração, há a formação de hemimicelas. As hemimicelas são formadas quando o aumento na concentração de amina inicia uma segunda etapa de adsorção do reagente na superfície das partículas, resultando na exposição da parte polar (hidrofílica) da amina à água, devolvendo a hidrofilicidade à superfície mineral (Totou, 2010). Esse fenômeno ocorre quando a quantidade de coletor excede a de sítios negativos disponíveis, inibindo a flotação e reduzindo a recuperação do mineral.

Figura 8 - Curva típica da influência da concentração de amina na recuperação do mineral



Fonte: Baltar, 2021

Das aminas existentes, as mais comumente usadas na flotação do minério de ferro são as eteraminas. Isso se deve ao baixo custo à boa solubilidade dessas aminas, que, mesmo diminuindo um pouco o poder de coleta, as torna mais seletivas na flotação. As eteraminas podem ser classificadas em etermonoaminas e

eterdiaminas. As etermonoaminas são produzidas a partir de aminas graxas, que reagem com acrilonitrila (C_3H_3N), resultando na formação de um grupo $O(CH_2)_3$ entre a cadeia carbônica e o grupo amina (Matos, 2022). Segundo Baltar (2021), a inserção do oxigênio entre os carbonos é responsável pelo aumento da solubilidade da amina, tornando-a menos hidrofóbica e, por consequência, mais seletiva. As eterdiaminas, por sua vez, são formadas pela reação de uma etermonoamina com uma acrilonitrila.

De acordo com Matos (2022), as etermonoaminas comercializadas normalmente possuem entre 8 e 12 carbonos em sua cadeia hidrocarbônica, enquanto as eterdiaminas possuem entre 12 e 18 carbonos. Baltar (2021) explica que, embora os produtos comerciais sejam constituídos por aminas com diferentes tamanhos de cadeia carbônica, os produtos à base de dodecilaminas (12 carbonos) são os mais utilizados na flotação.

A Tabela 4 apresenta estudos sobre a flotação reversa em bancada de minério de ferro, incluindo o teor de ferro e sílica da alimentação, o tipo de eteramina utilizado (monoamina ou diamina), e as dosagens utilizadas.

Tabela 4 - Estudos que utilizaram eteraminas na flotação do minério de ferro, apresentando teor da alimentação e tipo e dosagens de eteramina utilizados

% Fe alimentação	%SiO₂ alimentação	Tipo de eteramina	Dosagens utilizadas (g/t)	Fonte
44,30	34,16	Eterdiamina M73	25 – 50 – 75 - 100	Matos, 2022
43,64	34,64	Etermonoamina Flotigam EDA	70 – 100 – 120	Rocha, 2017
52,90	19,19	Eterdiamina TOMAH DA16- 30	150 – 300 – 450	Castro, 2012
35,34	48,02	Eteramina Flotigam EDA	75 – 100 – 125 – 150 – 200	Lopes, 2009

45,90	25,60	Eteramina Flotigam 16424	50 – 75 – 100 – 150 – 200	Bicalho, 2019
-------	-------	-----------------------------	------------------------------	---------------

Fonte: Matos, 2022; Rocha, 2017; Castro, 2012; Lopes, 2009; Bicalho, 2019

Quanto aos resultados encontrados, Matos (2022) obteve valores maiores de rejeição de sílica no concentrado e seletividade para maiores dosagens de coletor, chegando a um concentrado com 66,43% de ferro e 2,02% de sílica para a dosagem de 100 g/t. Rocha (2017) observou que os testes com dosagem de amina (100 e 120 g/t) produziram concentrados com menos que 3% de teor de sílica. Castro (2012) utilizando 450 g/t de eteramina, produziu um concentrado com 1,21% de sílica 50,19% de recuperação metálica. Para Lopes (2009), o teste com 150 g/t de amina produziu resultados superiores aos testes com 200 g/t. O teste com 150 g/t possuía 66,41% de ferro e 3,88% de sílica, enquanto o teste com 200 g/t atingiu 64,72% de ferro e 5,93% de sílica. Por fim, Bicalho (2019) atingiu sua meta de recuperação metalúrgica (maior que 75%) e teor de sílica no concentrado (menor que 2%) para a dosagem de 100 g/t. Neste estudo, embora as dosagens de 150 e 200 g/t tenham diminuído o teor de sílica para menos que 1%, elas também diminuíram a recuperação metalúrgica.

d) Reprocessamento do Minério de Ferro por Meio de Flotação

A seguir, são descritos alguns exemplos de aplicações de flotação catiônica reversa para reprocessamento de rejeitos de minério de ferro.

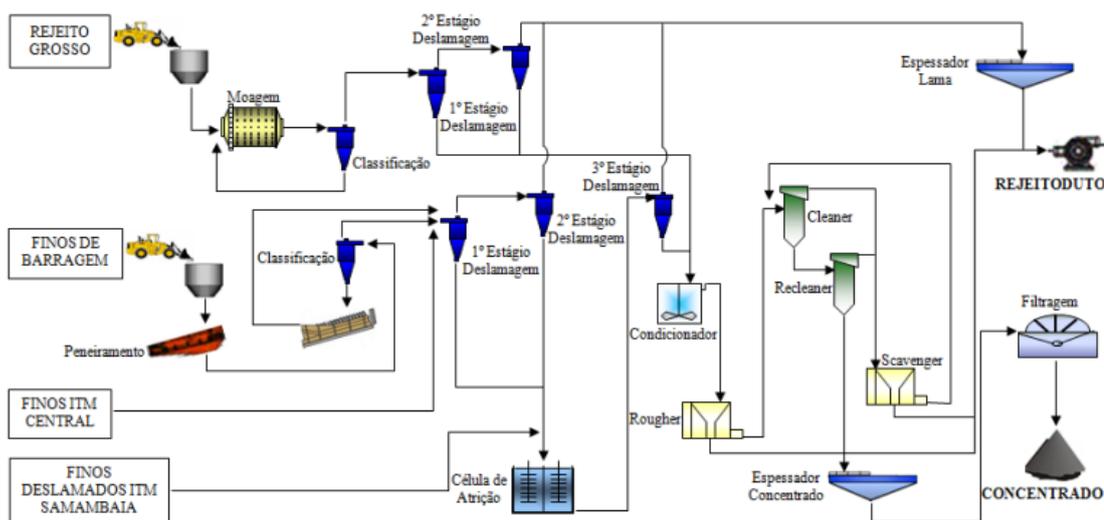
Rocha (2008) avaliou a recuperação de materiais finos (lamas) do rejeito da mina Casa de Pedra (Congonhas/MG). Após caracterização tecnológica das lamas, constatou-se que a amostra possuía 38,23% de ferro e 37,05% de sílica, com d_{90} igual a 12,2 μm . Os ensaios de concentração em escala de bancada e escala piloto utilizaram deslamagem e flotação catiônica reversa para a recuperação de ferro. Foram testadas diferentes dosagens do depressor amido de milho (600, 1000 e 1200 g/t, com condicionamento de 5 minutos) e do coletor amina (25,30 e 55 g/t, com condicionamento de 1 minuto), além de variações no pH utilizando-se NaOH. Os resultados indicaram que foi possível produzir um concentrado ultrafino com 20% de recuperação mássica, o que acarretaria em uma produção adicional de 1,4 milhões

de toneladas anuais de concentrado para a mina. Além disso, o concentrado possuía menos de 1% de sílica e entre 67% e 70% de ferro, e o novo rejeito possuía 12% de ferro. Foi constatado que o aumento na dosagem de depressor influenciou mais os resultados que o aumento na dosagem de coletor.

Mitov *et al* (2021) processaram o rejeito proveniente de uma barragem em Kremikovtzi (Bulgária). A amostra de rejeito possuía 45,72% de ferro e traços de chumbo, prata, zinco e carbono. O processamento se deu por meio de flotação inicial de chumbo, zinco, prata e componentes orgânicos, seguida de flotação reversa, deslamagem e separação magnética com intensidade de campo igual a 1800 Gauss. Como resultado, obteve-se um concentrado com 40,77% de recuperação mássica, 63,14% de ferro, 2,15% de sílica e menos de 4% de chumbo, zinco, prata e carbono somados.

Uma aplicação de reprocessamento de rejeitos por flotação encontrada na indústria é o caso da Mineração Usiminas. Em 2014, a empresa iniciou a extração do material presente em sua Barragem Central (Itatiaiuçu/MG) e o direcionou para uma de suas Instalações de Tratamento de Minério (ITMs). A ITM flotação foi desenvolvida especificamente para receber os rejeitos (grossos e finos) de jigagem e espiralagem das ITMs Oeste, Samambaia e Central e os rejeitos finos da Barragem Central. A concentração é realizada por flotação catiônica reversa após deslamagem prévia (Rocha, 2017; Nogueira; Viegas., 2018). A Figura 9 apresenta o fluxograma de processo da ITM flotação.

Figura 9 - Fluxograma da ITM Flotação da empresa USIMINAS



Fonte: Rocha, 2017

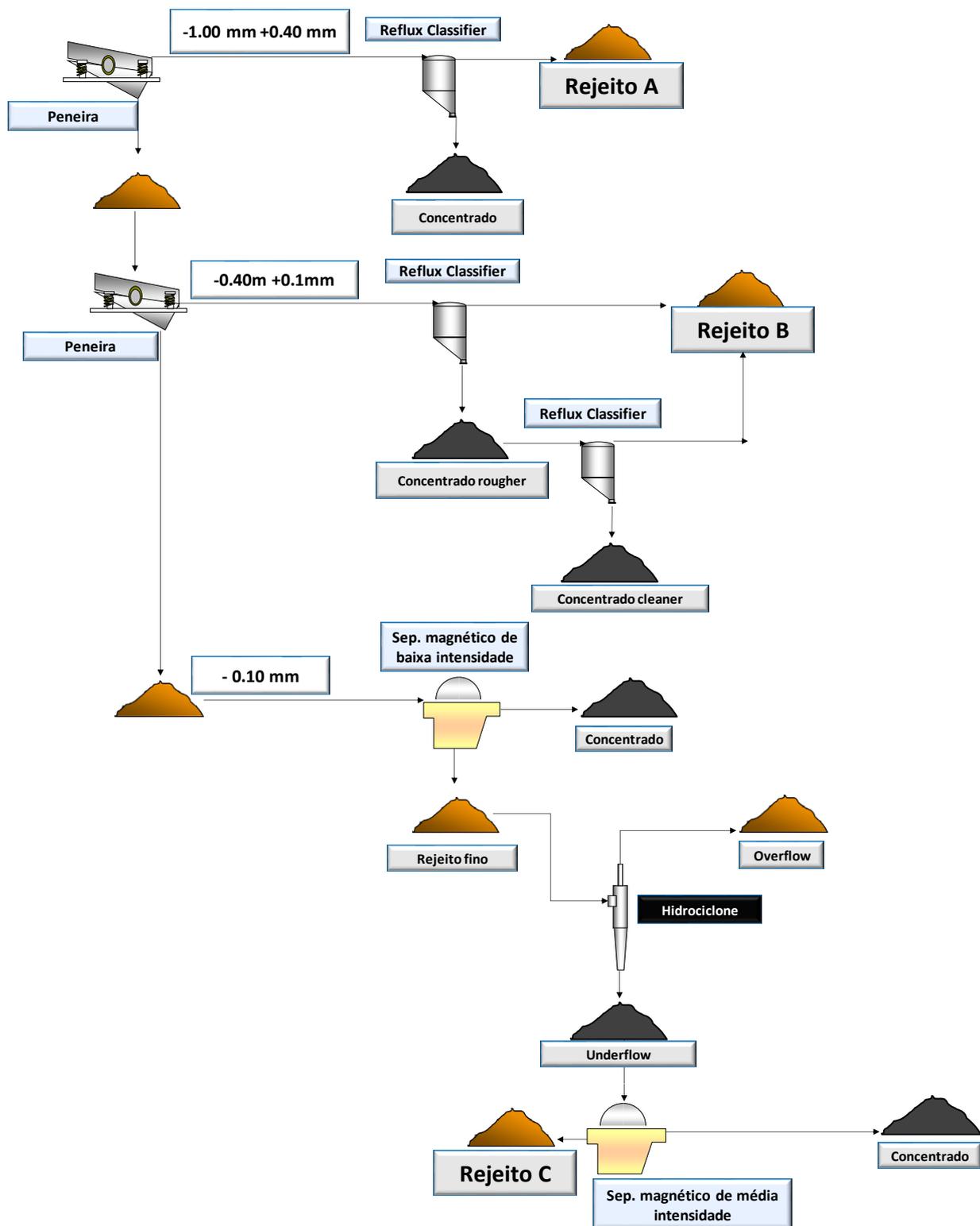
Segundo Nogueira e Viegas (2018), o rejeito grosso proveniente das ITMs, que alimenta a moagem, apresenta uma composição de 51,60% de ferro e 20,59% de sílica, enquanto os finos provenientes da barragem possuem, em média, 44,39% de ferro e 30,99% de sílica. O concentrado produzido possui, em média, 60% de recuperação mássica (em fevereiro de 2018 a recuperação mássica foi de 73,5%), com 64,5% de ferro e 3,5% de sílica. Os reagentes utilizados na planta são amido de milho como depressor, amina como coletor e NaOH como modulador de pH (Rocha, 2017).

A planta de beneficiamento possui capacidade de produzir até 4 milhões de toneladas de pellet feed por ano. A instalação dessa planta não apenas aumentou da vida útil do empreendimento, mas também levou a Mineração Usiminas a receber, em 2022, o certificado de descaracterização da Barragem Central pela FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente). Tal certificação, declara a barragem oficialmente extinta, sem apresentar riscos ao meio ambiente e à população (USIMINAS, 2022).

4 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os métodos experimentais adotados para desenvolver uma rota de beneficiamento para recuperar rejeitos de minério de ferro. Este estudo utilizou três amostras de rejeito de minério de ferro de diferentes faixas de tamanho. Os rejeitos em questão foram gerados no processo de concentração ilustrado na Figura 10. O processo consistiu na separação do minério em três faixas granulométricas, e na concentração por meio de separação gravítica (*reflux classifier*) e separação magnética de baixa e média intensidade. Cada faixa granulométrica gerou um rejeito diferente.

Figura 10 - Rota de concentração do minério de ferro estudado, identificando a origem de cada rejeito



Fonte: Autor, 2024

4.1 Caracterização das amostras

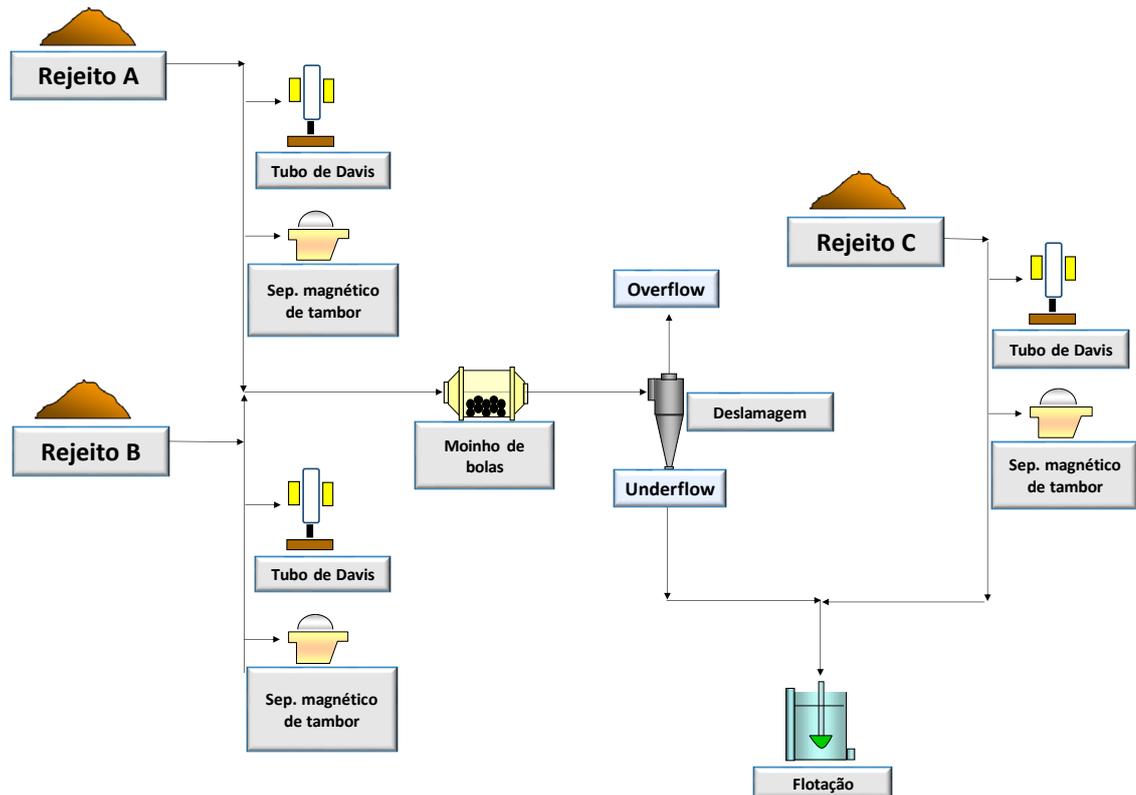
As amostras dos rejeitos A, B e C utilizadas foram homogeneizadas pelo método do cone, utilizando uma pá e uma lona, e subsequentemente quarteadas obtendo-se as amostras que foram utilizadas na caracterização e nos ensaios de concentração.

Considerando as propriedades do rejeito em questão, optou-se por avaliar duas rotas de processamento, uma por meio de separação magnética e outra via flotação. Os testes foram divididos da seguinte forma:

- a) testes de separação magnética em escala de bancada, utilizando-se o equipamento Tube de Davis;
- b) testes de separação magnética em escala piloto, utilizando-se separadores magnéticos de tambor de baixa e média intensidades;
- c) testes de flotação em escala de bancada.

A Figura 11 ilustra todos os testes realizados com os rejeitos.

Figura 11 – Ensaio de concentração planejados para cada rejeito



Fonte: Autor, 2024

Também foi estudada a possibilidade de recircular o rejeito A, que é o que possui maior conteúdo metálico, no fluxograma original.

4.2 Separação Magnética em Escala de Bancada

Os testes de separação magnética em escala de bancada foram feitos com o Tubo Magnético de Davis, modelo EDT da fabricante Eriez, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Tubo magnético de Davis, modelo EDT



Fonte: Autor, 2024

No procedimento experimental no tubo de Davis, o tubo de vidro foi posicionado entre os polos do eletroímã a um ângulo de aproximadamente 45° e preenchido com água até a borda. Em seguida, o eletroímã foi ligado, e cerca de 50g do material foram inseridos lentamente na parte superior do tubo. À medida que o material descia pelo tubo, acompanhando o fluxo de água que estava sendo introduzido por um cano ligado ao tubo, as partículas paramagnéticas e ferromagnéticas eram retidas na região de influência do campo magnético.

Ligou-se o motor, fazendo com que o tubo realizasse movimentos ascendentes e descendentes, além de girar em torno de seu eixo. A turbulência causada pelos movimentos do tubo auxiliava na remoção de partículas não magnéticas, direcionando-as até a extremidade final do tubo, onde eram coletadas em um balde como a fração não magnética.

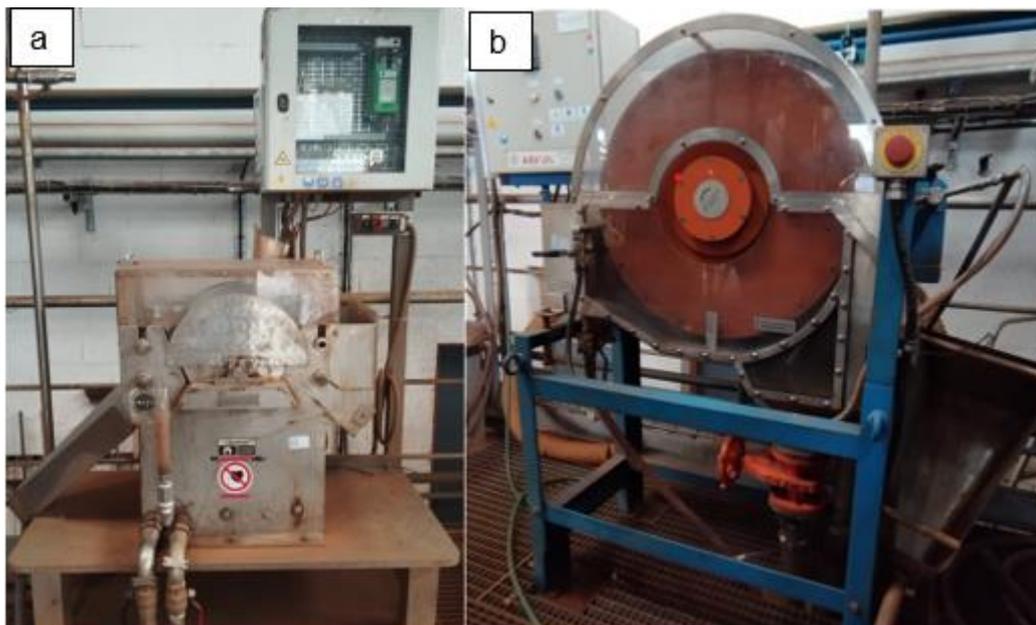
Quando não foram mais observadas partículas saindo da zona de magnetismo e alcançando o final do tubo, cessou-se a agitação do tubo, o balde da extremidade inferior do tubo foi trocado, e o eletroímã foi desligado. Com isso, as partículas presas à zona de magnetismo desceram pelo tubo até a extremidade inferior e foram coletadas no balde como a fração magnética.

Os testes foram realizados com as três amostras de rejeito, de forma separada. Para o rejeito A, foram realizados dois testes, um com campo magnético de intensidade igual a 1700 Gauss e outro com intensidade igual a 4200 Gauss, a maior intensidade que o equipamento consegue atingir. Esses valores foram selecionados por serem os mais próximos possíveis às intensidades de campo dos separadores magnéticos de tambor utilizados nos testes em escala piloto. Quanto aos rejeitos B e C, devido ao seu menor conteúdo metálico, decidiu-se por testar apenas a intensidade de campo mais alta. Desta forma, os rejeitos médio e fino passaram por um teste com intensidade de campo magnético igual a 4200 Gauss.

4.3 Separação Magnética em Escala Piloto

Os testes de separação magnética em escala piloto foram feitos com duas intensidades de campo distintas. Para os testes de baixa intensidade, foi utilizado o separador magnético de tambor *WET LIMS Sepor* modelo WDS – 1509-S da fabricante *Magnetic Products, Inc.*, apresentado na Figura 13a. Já os testes de média intensidade foram feitos com um segundo separador magnético de tambor WET MIMS, modelo WDRE-24X6H fabricado pela Inbras, apresentado na Figura 13b. Ambos os equipamentos possuem os mesmos princípios experimentais, com a principal diferença sendo a intensidade de campo magnético. O separador magnético de tambor de baixa intensidade possui uma intensidade de campo de 1700 Gauss, enquanto o separador magnético de tambor de média intensidade alcança 7000 Gauss.

Figura 13 – Separadores magnéticos de tambor em escala piloto utilizados



Legenda: a) Sep. magnético de baixa intensidade Magnetic Products, Inc. E b) Sep. Magnético de média intensidade Inbras

Fonte: Autor, 2024

O material foi alimentado aos separadores magnéticos de tambor na forma de polpa, com aproximadamente 15% de sólidos. Cada um dos rejeitos A, B e C foi submetido a dois testes de separação magnética, um com baixa intensidade de campo magnético e outro com média intensidade. A velocidade de rotação dos dois separadores foi mantida em 25 rpm.

Os resultados dos testes de separação magnética, tanto em escala de bancada quanto em escala piloto, foram analisados em termos de recuperação mássica e metalúrgica, e de teor de ferro e impurezas no concentrado.

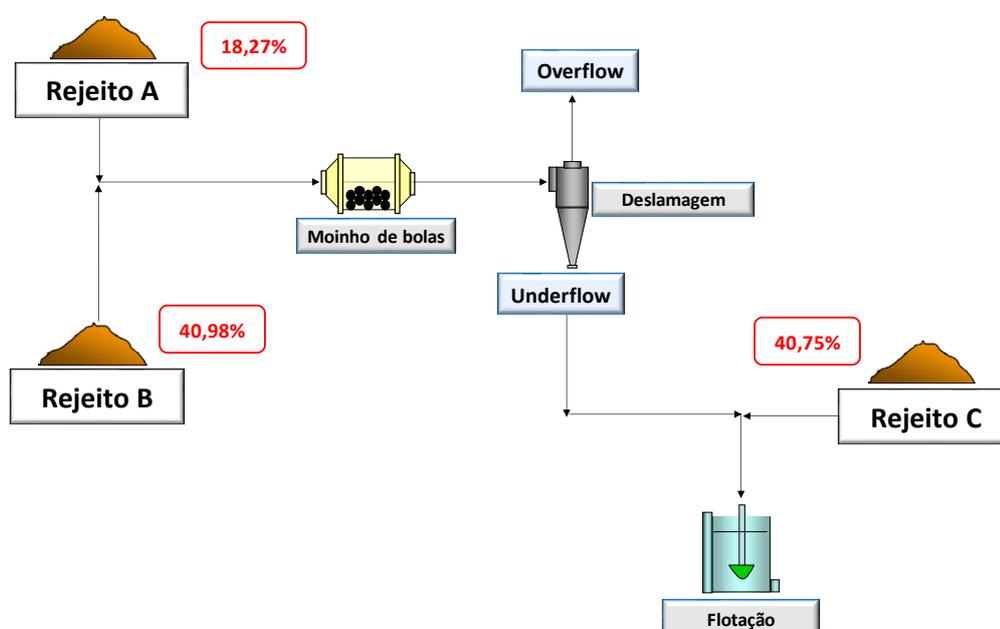
4.4 Flotação em Escala de Bancada

Os testes de flotação em escala de bancada foram feitos combinando os três rejeitos em uma única alimentação, respeitando-se a proporção em que cada um foi gerado no processo de beneficiamento do minério.

No entanto, foi necessário moer e deslamar os rejeitos A e B para que ambos apresentassem as mesmas características granulométricas do rejeito C, que passou por um processo de deslamaragem no fluxograma original do processo.

A Figura 14 apresenta o fluxograma das etapas de moagem, deslamaragem e flotação dos rejeitos, assim como a proporção inicial correspondente a cada rejeito utilizado.

Figura 14 - Fluxograma apresentando o processo de moagem, deslamaragem e flotação dos rejeitos, bem como a porcentagem mássica que cada um representa



Fonte: Autor, 2024

Considerando questões de custo e viabilidade do projeto, optou-se por moer os rejeitos A e B juntos, e não separados. Testes preliminares, que indicavam tempos similares de moagem para que os dois rejeitos atingissem P_{90} de 150 μm , corroboraram essa decisão.

Para definir o tempo de moagem adequado dos rejeitos, foram realizados testes experimentais moendo o material por três minutos, seis minutos, nove minutos, quinze minutos e vinte minutos. Após cada ciclo de moagem, a distribuição granulométrica do produto foi analisada. Plotaram-se curvas relacionando o tempo de

moagem com o P₉₀ dos produtos. A moagem foi realizada a seco utilizando-se o moinho de bolas de bancada, número de série 174307.00 da fabricante Sepor, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15- Moinho de bolas em escala piloto Sepor



Fonte: Autor, 2024

O processo de deslamagem foi feito na cuba de flotação em duas etapas, usando o seguinte método:

- a) 600 gramas do material foram colocados dentro da cuba de um litro e foram adicionados 230 mL de água;
- b) a agitação foi ajustada a 1200 rpm, e o sistema foi agitado por 5 minutos, após os quais a velocidade de agitação foi reduzida para 700 rpm e a cuba foi preenchida com água até o nível de transbordo;
- c) após mais 5 minutos de agitação, foi adicionado 1 litro de água, e o material transbordado da cuba foi coletado, correspondendo à primeira etapa de deslamagem;
- d) a agitação foi interrompida, e o sistema foi deixado em repouso por 5 minutos. Após esse tempo, o material sobrenadante foi coletado até 3/4 da altura da cuba, correspondendo à segunda etapa de deslamagem;
- e) o material que permaneceu na cuba, que correspondeu ao *underflow*, foi seco e posteriormente utilizado nos experimentos de flotação.

A massa perdida para o overflow foi pesada e correspondeu a 29,25% da massa total alimentada à deslamagem. Com base nesse valor, a alimentação final da flotação possuía 49,30% do rejeito C e 50,70% da mistura dos rejeitos A e B, moída e deslamada.

Os testes de flotação foram realizados na célula de flotação modelo D12 da Denver, fabricada pela Metso, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Célula de flotação de bancada Denver Metso



Fonte: Autor, 2024

Os ensaios de flotação foram realizados da seguinte forma:

- a) o material foi introduzido na célula de flotação como polpa com 70% de sólidos e deu-se início à agitação a 1200 rpm, mantendo o sistema em agitação por 5 minutos;
- b) em seguida, o pH foi medido, a solução de depressor foi adicionada e, após mais 5 minutos de agitação, o pH foi medido novamente e a porcentagem de sólidos da polpa foi ajustada para 40%;

- c) o pH foi então ajustado para 10,5, e as soluções de coletor e espumante foram adicionadas e condicionadas por 5 minutos, ao fim dos quais o pH foi novamente ajustado para 10,5;
- d) a velocidade de agitação foi reduzida para 900 rpm, e a válvula de ar foi aberta com vazão igual a 4 L/min, coletando a espuma até a exaustão;
- e) ao fim do processo, o concentrado foi transferido para uma bandeja, e os produtos foram secos e pesados.

Os parâmetros utilizados nos experimentos de bancada estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de cada etapa dos ensaios de flotação

Parâmetro	Agitação inicial	Condicionamento do depressor	Condicionamento do coletor e espumante	Flotação
Agitação (rpm)	1200	1200	1200	900
pH	Natural	Natural	10,5	10,5
Tempo (em minutos)	5,00	5,00	5,00	exaustão
% de sólidos	70%	60%	40%	40%

Fonte: Autor, 2024

A Tabela 6 apresenta os reagentes utilizados nos testes.

Tabela 6 – Função, fabricantes de concentração da solução dos reagentes utilizados nos testes de flotação

Reagente	Função	Fabricante	Concentração (g/L)
Amido de milho	Depressor	Sigma	4

Etermonoamina Flotigam EDA	Coletor	Clariant	4
Montanol 800	Espumante	Clariant	2
NaOH	Modulador de pH	Merck KGaA	10

Fonte: Autor, 2024

As soluções de reagentes foram preparadas da seguinte forma:

- a) pesaram-se 4 g de amido de milho em um béquer de 50 mL e foram adicionados 40 mL de água. Em um segundo béquer de 50 ml, pesou-se 1 g de NaOH, o qual também foi dissolvido em 40 ml de água. As duas soluções foram misturadas, e a mistura gelatinizada foi transferida para um béquer de 200 ml e agitada com um agitador magnético por 5 minutos. Em seguida, a solução foi transferida para um balão volumétrico de 1 L, o qual foi completado com água. A solução foi mantida em agitação até o momento dos testes.
- b) pesaram-se 2 g de amina EDA e foram dissolvidas em 50 mL de água em um béquer. Em seguida, a solução foi transferida para um balão volumétrico de 500 mL, o qual foi completado com água. A solução foi mantida em agitação com um agitador magnético até o momento dos testes.
- c) pesou-se 1 g de montanol e dissolveu em 50 ml de água em um béquer. Em seguida, a solução foi transferida para um balão volumétrico de 500 mL, o qual foi completado com água. A solução foi mantida em agitação com um agitador magnético até o momento dos testes.
- d) pesaram-se 5 g de NaOH e foram dissolvidos em 100 mL de água em um béquer. Em seguida, a solução foi transferida para um balão volumétrico de 500 mL, o qual foi completado com água. A solução foi mantida em agitação com um agitador magnético até o momento dos testes.

Foram realizados testes de flotação variando-se a concentração de amina utilizada, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Dosagens dos reagentes em cada teste

Teste	Dosagem de depressor (g/t)	Dosagem de coletor (g/t)	Dosagem de Espumante (g/t)
1	1000	100	50
2	1000	300	50
3	1000	500	50

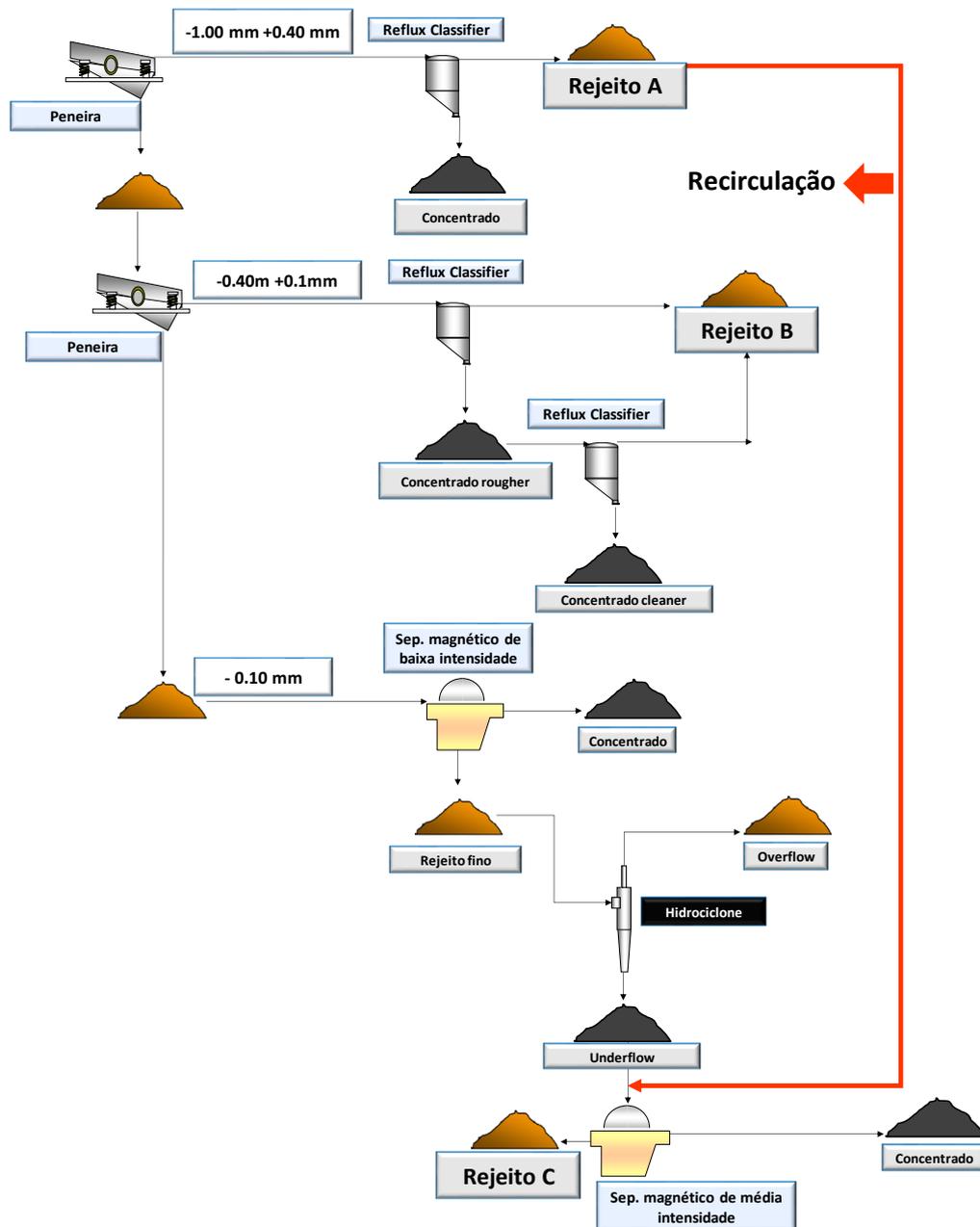
Fonte: Autor, 2024

Os resultados dos testes de flotação foram analisados em termos de recuperação mássica e metalúrgica, do índice de seletividade de Gaudin, e de teor de ferro e impurezas no concentrado.

4.5 Recirculação do rejeito A

A possibilidade de recircular o rejeito A no fluxograma já existente também foi avaliada, uma vez que este é o rejeito com maior teor de ferro. O estudo consistiu em introduzir o rejeito A no circuito de separação magnética, como indicado no fluxograma da Figura 17.

Figura 17 – Planejamento de recirculação do rejeito A no fluxograma original



Fonte: Autor, 2024

Para tanto, o rejeito A foi misturado ao material do *underflow* do hidrociclone, respeitando as proporções estabelecidas no balanço de massa do fluxograma original (30% de rejeito A e 70% de massa do *underflow*). Água foi adicionada à mistura até obtenção de uma polpa com aproximadamente 20% de sólidos. O material foi

alimentado ao separador magnético de tambor de média intensidade através do *Loop* de Cicloneamento LOOPBRAS da fabricante Brastorno (Figura 18).

O processo consistiu em agitar o material no tanque usando o agitador do equipamento para garantir a sua homogeneização. Posteriormente, a mistura foi bombeada até o separador magnético por meio de uma bomba centrífuga. O separador magnético de média intensidade utilizado está apresentado na Figura 11.b, com uma intensidade de campo magnético de 7000 Gauss e uma velocidade de rotação do tambor igual a 25 rpm.

Figura 18 - Loop de cicloneamento LOOPBRAS Brastorno



Fonte: Brastorno, 2023

4.6 Caracterização dos produtos

A seguir, são apresentadas as técnicas utilizadas para as análises de caracterização química, física e mineralógica para os três rejeitos e para todos os produtos dos ensaios de concentração.

4.6.1 Análise mineralógica

A análise mineralógica foi feita para os três rejeitos processados por meio de difratometria de raios-X, utilizando o difratômetro XRD D2 Phaser, da fabricante Bruker. Também foi realizada a semiquantificação das fases minerais.

4.6.2 Análise química

A análise química foi realizada por uma empresa terceirizada para os três rejeitos processados, bem como todos os produtos resultantes dos testes. Foram determinados os teores de Fe, FeO, SiO₂, P, Al₂O₃, CaO, MgO, TiO₂, Mn, K₂O e perda por ignição, utilizando a técnica de fluorescência de raios X (FRX).

4.6.3 Análise de densidade

A densidade foi aferida para os três rejeitos processados, bem como para os produtos da separação magnética em planta piloto e os produtos dos testes de flotação. A densidade foi determinada por meio de picnometria a gás, utilizando o equipamento modelo AccuPyc II da fabricante MicroMeritics, com gás Hélio (He).

4.6.4 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada para os três rejeitos, bem como os produtos gerados nos testes de flotação. Além disso, os produtos resultantes do processo de moagem e deslamagem dos rejeitos A e B também foram submetidos à análise.

Foi realizado peneiramento a úmido utilizando o equipamento Sinex AT 450, com a série de peneiras variando de acordo com as características de tamanho de cada rejeito e dos produtos dos ensaios de concentração.

No caso dos três rejeitos, foi realizada a análise química de cada faixa granulométrica. Já para os produtos de moagem, deslamagem e flotação, as faixas granulométricas foram agrupadas em quatro categorias principais, que foram posteriormente submetidas à análise química. A Tabela 8 apresenta as faixas granulométricas utilizadas para cada produto.

Tabela 8 – Aberturas das peneiras utilizadas nas análises granulométricas

Amostra	Peneiras utilizadas (μm)							
Rejeito A	1000	600	425	300	212	150	106	-
Rejeito B	425	300	212	150	106	75	63	-
Rejeito C	105	75	63	53	45	38	25	-
Produtos da moagem, deslamagem e flotação	150	105	75	63	53	45	38	25

Fonte: Autor, 2024

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na caracterização dos rejeitos processados, nas etapas de separação magnética em escalas de bancada e piloto, nos testes de flotação de bancada, e na recirculação do rejeito no fluxograma original do processo.

5.1 Caracterização dos Rejeitos

Neste tópico, são apresentados os resultados da caracterização química, granulométrica e mineralógica dos rejeitos A, B e C. A Figura 19 apresenta uma amostra dos três rejeitos.

Figura 19 - Amostra dos rejeitos A, B e C



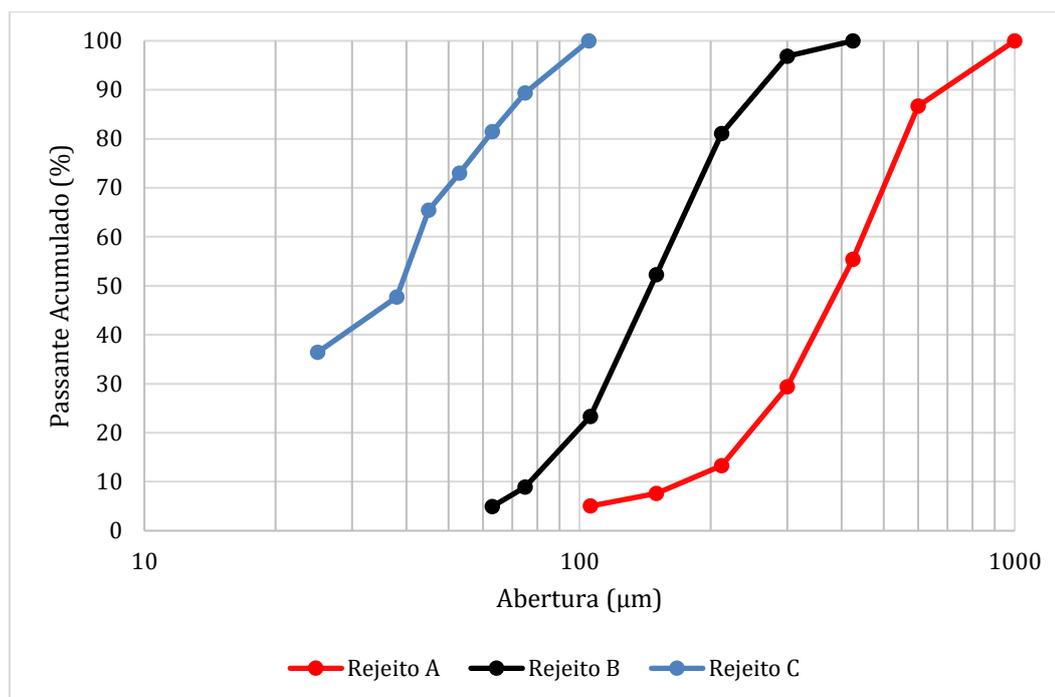
Fonte: Autor, 2024

5.1.1 Análise Granulométrica

Os resultados da análise granulométrica dos três rejeitos são apresentados na Figura 20, enquanto os valores de d_{50} e d_{80} de cada um se encontram na Tabela 9.

Nota-se que o rejeito A é o mais grosseiro dos três, seguido pelo rejeito B, e, por fim, o rejeito C é o mais fino. Essa característica é explicada pelo fluxograma original do minério, no qual o material é dividido em três frações por meio de duas peneiras (uma de 400 μm e uma de 100 μm). Cada fração segue por um fluxo diferente, resultando em três produtos distintos: dois *sinter feed* e um *pellet feed*. Dessa forma, três rejeitos de granulometrias diferentes foram gerados.

Figura 20 - Distribuição granulométrica dos rejeitos A, B e C



Fonte: Autor, 2024

Tabela 9 - Distribuição granulométrica dos rejeitos A, B e C

Amostra	d_{50} (μm)	d_{80} (μm)
Rejeito A	401,6	564,1
Rejeito B	147,1	209,7
Rejeito C	39	61,2

Fonte: Autor, 2024

5.1.2 Análise Química

Os resultados das análises química dos três rejeitos (Tabela 10) mostram que o rejeito A possui maior teor de ferro e menor teor de sílica, enquanto o rejeito B possui o menor teor de ferro, e o rejeito C possui valores intermediários. Essa variação pode ser explicada pela análise do fluxograma original do minério: a fração mais grosseira, que gera o rejeito A, passa apenas por um estágio de concentração (Reflux classifier). Em contraste, os rejeitos B e C passam por duas etapas; o rejeito B passa por dois estágios (*rougher e cleaner*) de Reflux, e o rejeito C é submetido à separação magnética de baixa intensidade, seguida por deslamagem e separação magnética de média intensidade.

Tabela 10 - Composição química dos rejeitos A, B e C

Amostra	Composição química (%)				
	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn
Rejeito A	45,15	31,80	0,44	0,06	0,05
Rejeito B	10,82	83,13	0,37	0,07	0,03
Rejeito C	27,20	55,90	0,90	0,10	0,05

Fonte: Autor, 2024

A seguir, são apresentadas as análises granuloquímicas dos rejeitos. Para o rejeito A (Tabela 11), as frações granulométricas mais finas apresentam teores similares de ferro e sílica, enquanto que a fração mais grosseira apresenta o menor teor de ferro e maior teor de sílica. Observa-se a distribuição preferencial de ferro e sílica na fração entre 300 e 425 μm , representando mais de 55% das distribuições de ambos os elementos.

Tabela 11 - Análise Granuloquímica do Rejeito A

Fração (μm)	% retida	Composição química (%)					Distribuição (%)	
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	Fe	SiO ₂
100-600	13,33	38,81	39,50	0,78	0,07	0,05	11,46	16,56
425-300	57,27	45,53	30,98	0,44	0,06	0,05	57,76	55,80
212-106	24,35	47,25	30,56	0,25	0,04	0,04	25,48	23,40
-106	5,05	47,39	26,70	0,50	0,07	0,05	5,30	4,24
Global	100,00	45,15	31,80	0,44	0,05	0,04	100,00	100,00

Fonte: Autor, 2024

Os resultados das análises granuloquímicas do rejeito B (Tabela 12) indicam que as frações mais finas (menores que 106 μm) apresentam maior teor de ferro e menor teor de sílica. A fração de 212 a 150 μm , que corresponde a uma fração considerável da massa (44,59%), apresenta o menor teor de ferro.

Tabela 12 - Análise Granuloquímica do Rejeito B

Fração (μm)	% retida	Composição química (%)					Distribuição (%)	
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	Fe	SiO ₂
425-300	3,12	7,17	89,70	0,44	0,02	0,03	2,07	3,37
212-150	44,59	6,65	89,70	0,27	0,11	0,03	27,43	48,11
106-63	47,36	13,81	79,19	0,35	0,03	0,03	60,49	45,11
-63	4,93	21,98	57,5	1,36	0,15	0,10	10,02	3,14
Global	100,00	10,82	83,13	0,37	0,07	0,03	100,00	100,00

Fonte: Autor, 2024

Os resultados das análises granuloquímicas do rejeito C (Tabela 13) mostram que as frações mais finas (menores que 45 μ m) apresentam os maiores teores e distribuições de ferro, enquanto a fração mais grossa possui menor teor de ferro e maior teor de sílica. Essa observação pode ser atribuída à dificuldade de concentrar partículas finas de minério por meio de separação magnética. Wills e Napier-Munn (2006) estabelecem a aplicabilidade efetiva da separação magnética, seja de alta ou baixa intensidade, é para partículas a partir de 60 μ m de tamanho, o que explica a perda de parte do ferro contido em partículas menores que 45 μ m para o rejeito.

Tabela 13 - Análise Granuloquímica do Rejeito C

Fração (μ m)	% retida	Composição química (%)					Distribuição (%)	
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	Fe	SiO ₂
105-75	10,61	12,90	79,60	0,56	0,043	0,03	5,03	15,11
63-53	16,36	18,37	70,73	0,55	0,05	0,04	11,05	20,70
45-25	36,63	23,76	62,18	0,64	0,07	0,04	32,00	40,75
-25	36,40	38,8	36,00	1,42	0,16	0,066	51,92	23,44
Global	100,00	27,20	55,90	0,90	0,10	0,05	100,00	100,00

Fonte: Autor, 2024

5.1.3 Análise de Densidade

Os valores de densidade obtidos foram 3,74 g/cm³ para o rejeito A, 2,93 g/cm³ para o rejeito B e 3,19 g/cm³ para o rejeito C.

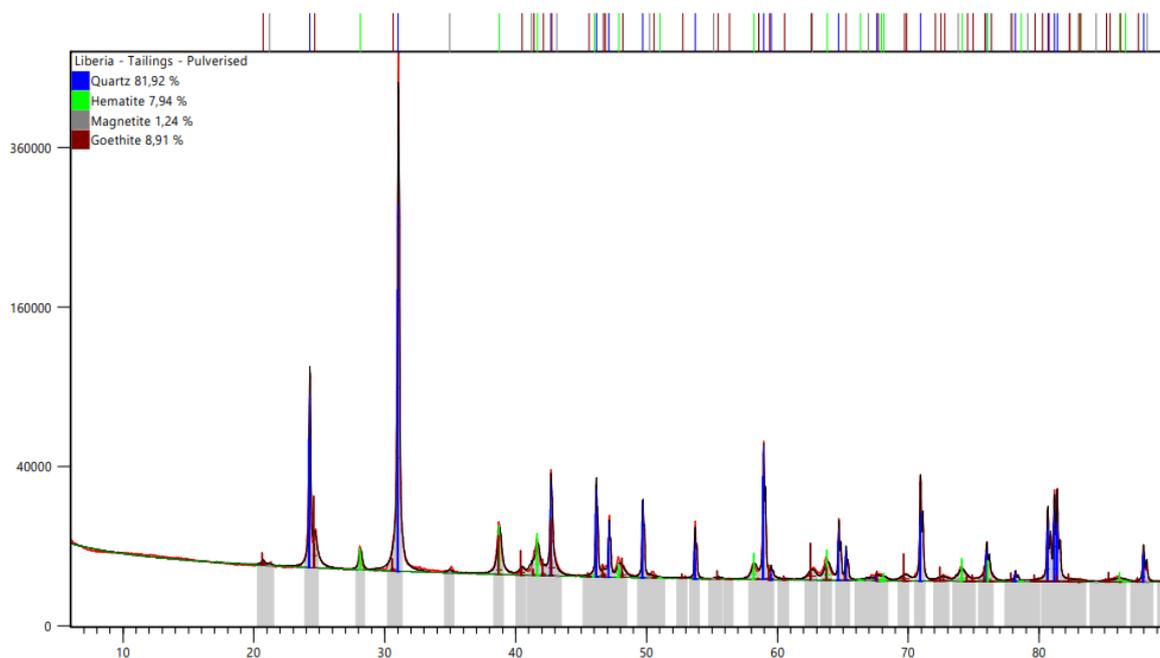
5.1.4 Análise Mineralógica

Os três rejeitos apresentam os mesmos componentes minerais: magnetita, hematita, goethita e quartzo. Contudo, as proporções desses componentes variam entre os diferentes rejeitos.

O rejeito A apresenta 7,6% de magnetita, 37,9% de hematita, 17,5% de goethita e 37,1% de quartzo.

O rejeito B (Figura 21) possui 1,24% de magnetita, 7,94% de hematita, 8,91% de goethita e 81,92% de quartzo.

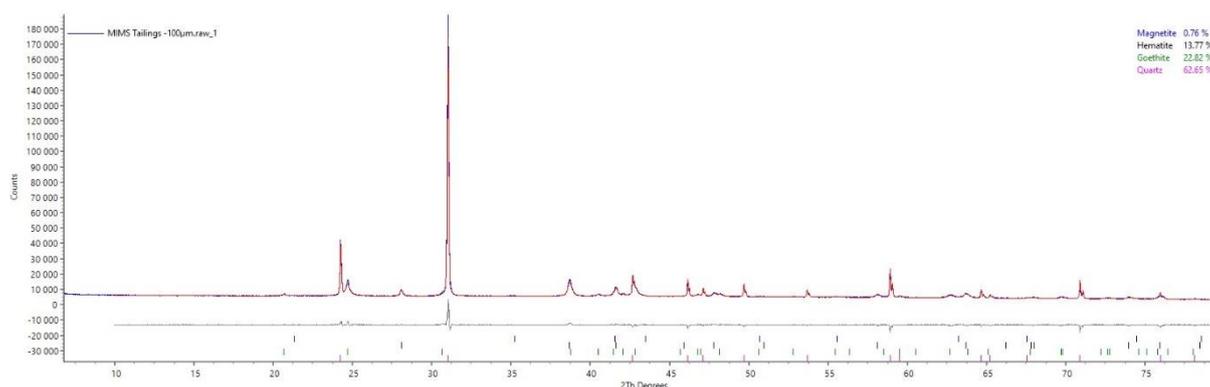
Figura 21 - Difratoograma de raio X do Rejeito B



Fonte: Autor, 2024

O rejeito C (Figura 22) apresenta 0,76% de magnetita, 13,77% de hematita, 22,82% de goethita e 62,65% de quartzo.

Figura 22 - Difratoograma de raios X do rejeito C



Fonte: Autor, 2024

A mineralogia dos rejeitos está em consonância com os resultados da análise química. O rejeito A, com maior teor de ferro, apresenta as maiores porcentagens de magnetita, hematita e goethita, seguido pelo rejeito C e, por fim, o rejeito B, que possui menor teor e menores porcentagens de minerais portadores de ferro. Nota-se que o rejeito C exibe a menor porcentagem de magnetita, pois passa por uma etapa de separação magnética de baixa intensidade no fluxograma original, realizada com o propósito de recuperar a magnetita.

5.2 Ensaios de Separação Magnética

Os ensaios de separação magnética foram realizados em escala de bancada e em planta piloto. Os resultados são apresentados a seguir.

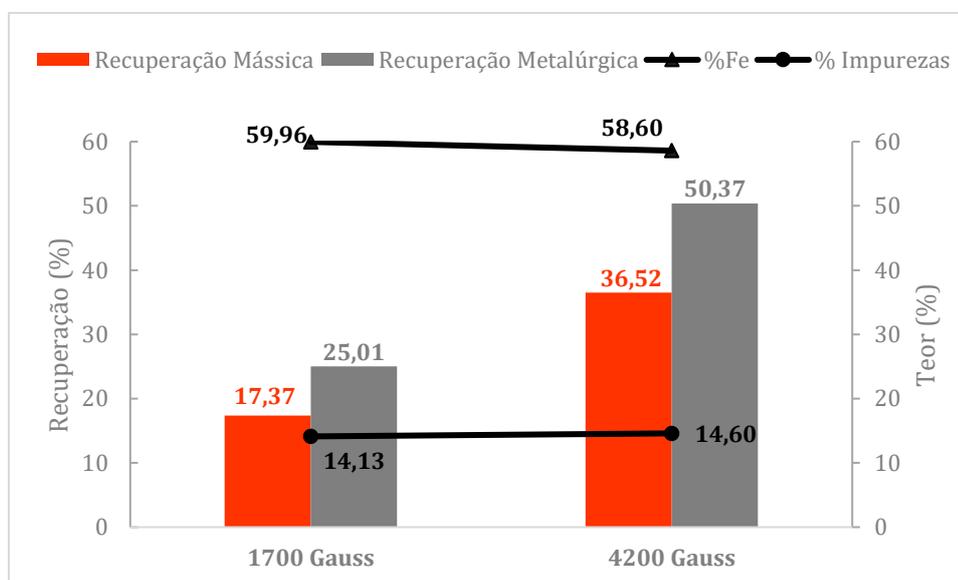
5.2.1 Ensaios de Bancada (Tubo de Davis)

Para o rejeito A, que passou por testes com duas intensidades de campo distintas no Tubo de Davis, observa-se um aumento na recuperação mássica em quase 19 pontos percentuais ao elevar o campo magnético de 1700 G para 4200 G. Os teores de ferro e sílica no concentrado foram semelhantes para ambos os testes, indicando que o rejeito A pode ser submetido ao campo magnético de maior intensidade, aumentando a recuperação mássica, sem comprometer a qualidade do concentrado.

Entretanto, os resultados mostram que não foi possível atingir o objetivo estabelecido para teor de ferro e impurezas com nenhum dos campos magnéticos testados. Em ambos os casos, o concentrado totalizou menos de 62% de ferro e mais de 10% de impurezas. Isso indica que a separação magnética não é uma rota viável de concentração para o rejeito A em apenas um estágio. Como o teste com 4200 G alcançou recuperação mássica consideravelmente acima da objetivada, pode-se estudar a possibilidade de um segundo estágio de concentração para tentar melhorar a qualidade do concentrado, ainda recuperando a quantidade de massa esperada.

A Figura 23 apresenta os valores de recuperação e teor obtidos para o concentrado dos dois testes.

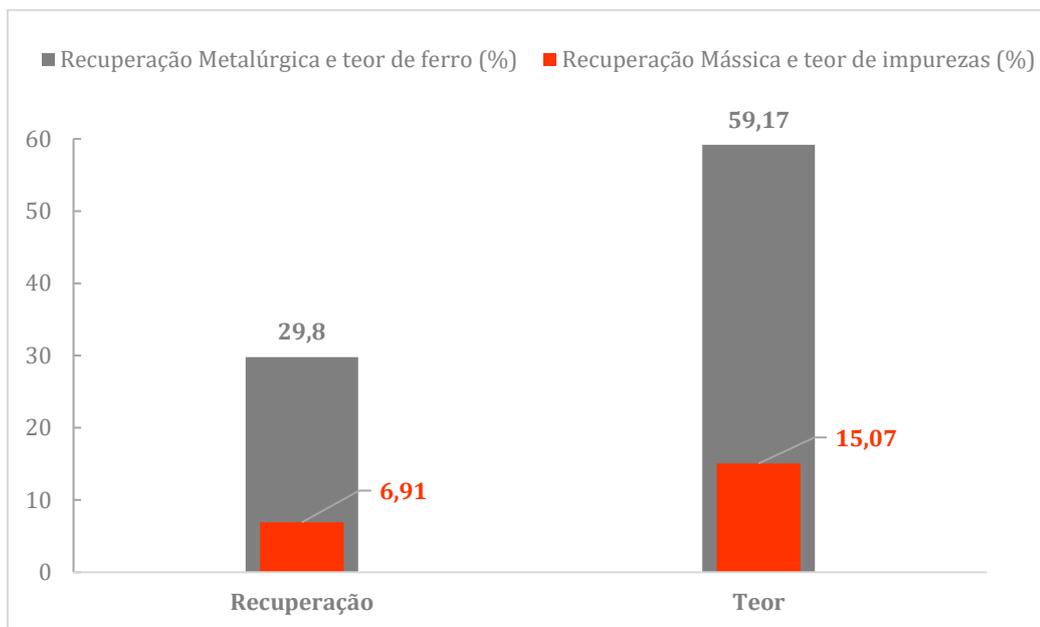
Figura 23 – Resultados dos ensaios de concentração com Tubo de Davis para o rejeito A



Fonte: Autor, 2024

Como o rejeito B possuía menor teor de ferro, foi testada apenas a maior intensidade de campo magnético, 4200 G. Novamente, o concentrado produzido não atingiu os valores objetivados de teores de sílica e ferro, e a recuperação mássica foi de 6,91%, uma taxa muito baixa para viabilizar um segundo estágio de concentração e melhorar sua qualidade. Dessa forma, a separação magnética não aparenta ser uma rota viável de concentração para o rejeito B. A Figura 24 apresenta os valores do concentrado produzido.

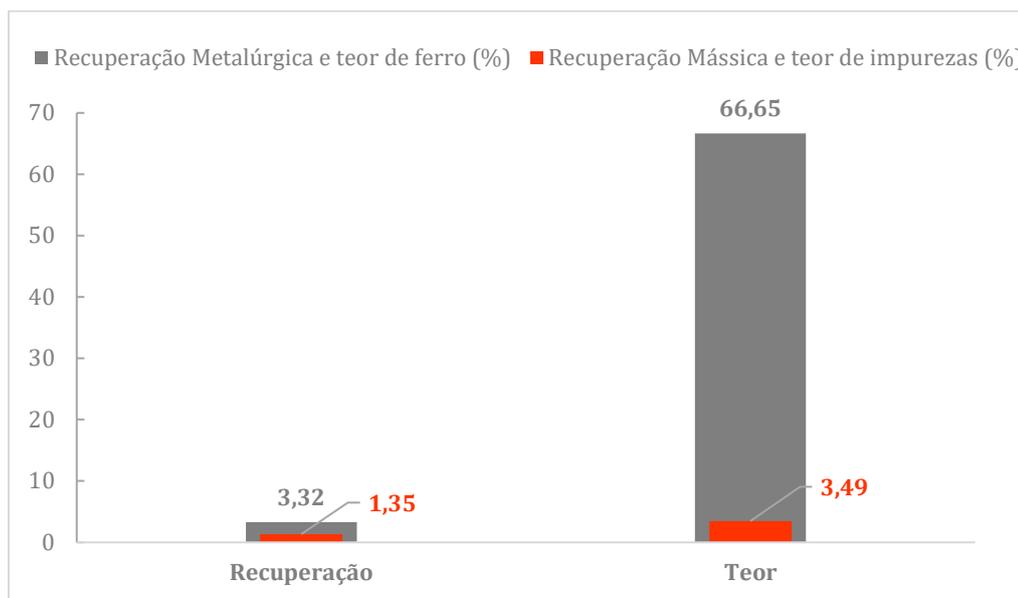
Figura 24 - Resultados do ensaio de concentração com Tubo de Davis com 4200 G para o rejeito B



Fonte: Autor, 2024

Para o rejeito C, também foi testada apenas a maior intensidade campo. O concentrado produzido apresentou valores desejados de teor de ferro (66,65%) e total de impurezas. Entretanto, a meta para recuperação mássica não foi alcançada, ficando em apenas 1,35%, inviabilizando o reprocessamento deste rejeito por separação magnética. Os valores de concentrado para o rejeito C estão apresentados na Figura 25.

Figura 25 - Resultados do ensaio de concentração com Tubo de Davis com 4200 G para o rejeito C



Fonte: Autor, 2024

5.2.2 Ensaios em planta piloto (Separadores magnéticos de tambor)

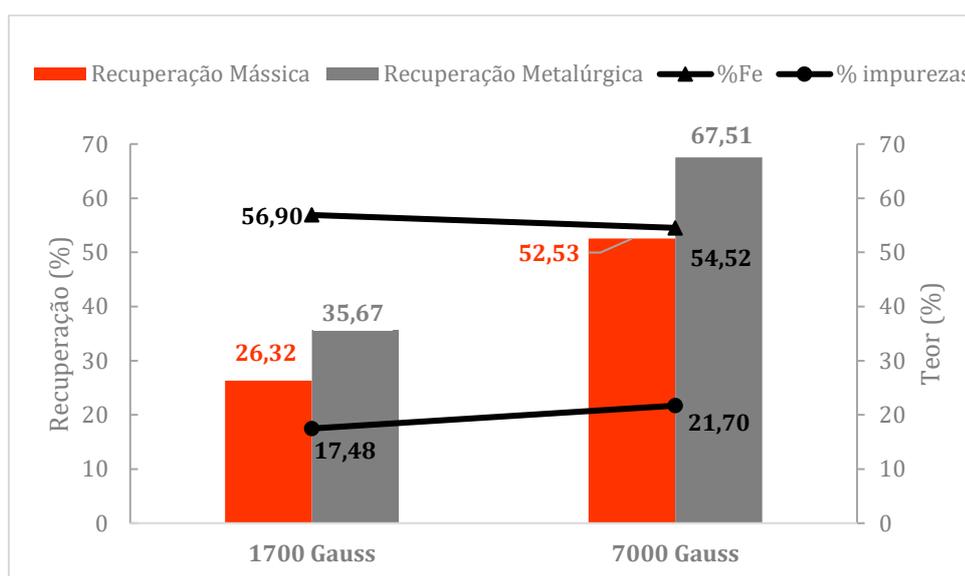
Os resultados dos experimentos em planta piloto para o rejeito A corroboram os valores encontrados em bancada. Novamente, observou-se um aumento na recuperação mássica ao se aumentar a intensidade do campo magnético, e a variação de teor de ferro foi de 2,38% entre os dois concentrados. Por outro lado, a variação no teor de impurezas foi maior, aumentando 4,22% do teste com 1700 G para o teste com 7000 G.

Ambos os concentrados, contudo, não atingiram os valores meta de teor de ferro e impurezas, reforçando a inviabilidade de concentrar o rejeito A em apenas um estágio de separação magnética. A possibilidade de introduzir um estágio *cleaner* de concentração após a separação magnética *rougher* com 7000 G pode ser avaliada, uma vez que esse teste recuperou 54,52% da massa. Um novo estágio de separação magnética poderia potencialmente alcançar concentrados com teores mais altos de ferro e mais baixo de impurezas, ainda recuperando uma quantidade considerável de massa. Outra alternativa seria moer o rejeito A antes da separação magnética, de forma que o tamanho ficasse mais adequado à faixa de aplicabilidade do separador magnético de média intensidade sugerida por Wills e Napier-Munn (2006),

umentando a eficiência da separação. É necessário testar essas hipóteses com testes adicionais.

A Figura 26 apresenta os valores alcançados pelos concentrados dos dois testes.

Figura 26 - Resultados dos ensaios de concentração com separadores magnéticos de tambor para o rejeito A

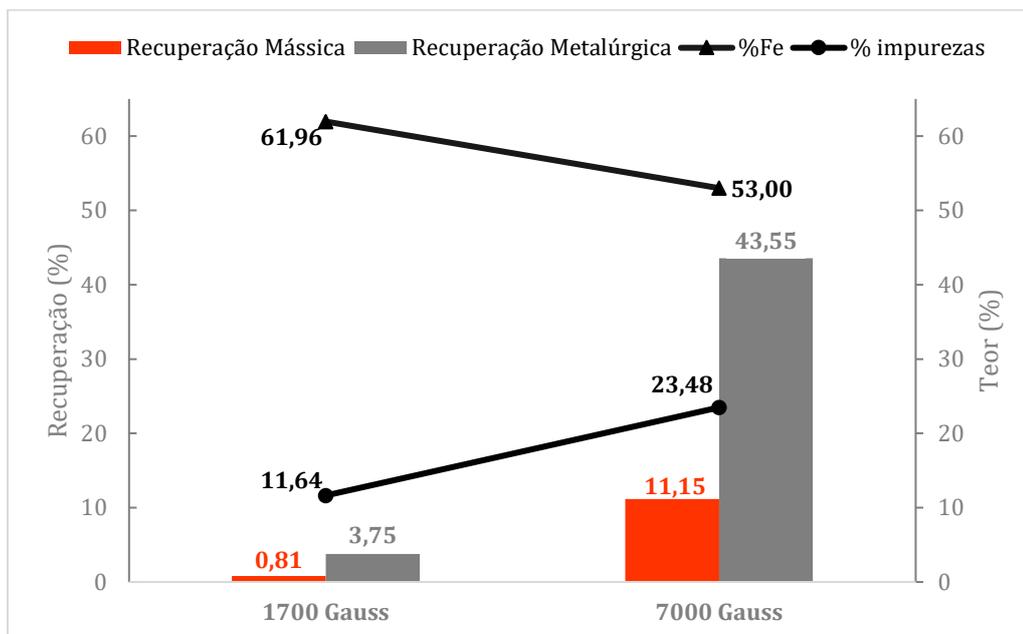


Fonte: Autor, 2024

Para o rejeito B, ambos os testes em planta piloto apresentaram valores baixos de recuperação mássica – 0,81% para o teste com 1700 G e 11,15% para o teste com 7000 G. Além disso, o teor de ferro no concentrado diminuiu de 61,96% no primeiro teste para 53% no segundo. Os teores de impurezas foram altos em ambos os testes, e a baixa recuperação mássica inviabiliza um segundo estágio de concentração que poderia purificar o concentrado. Desta forma, confirma-se a conclusão do teste em bancada de que o rejeito B não pode ser reprocessado e produzir um concentrado com os valores almejados de teor e de recuperação mássica via separação magnética. O teor de ferro do rejeito B se mostrou insuficiente para permitir a concentração por meio de separação magnética

A Figura 27 apresenta os valores dos testes de separação magnética em planta piloto para o rejeito B.

Figura 27 - Resultados dos ensaios de concentração com separadores magnéticos de tambor para o rejeito B

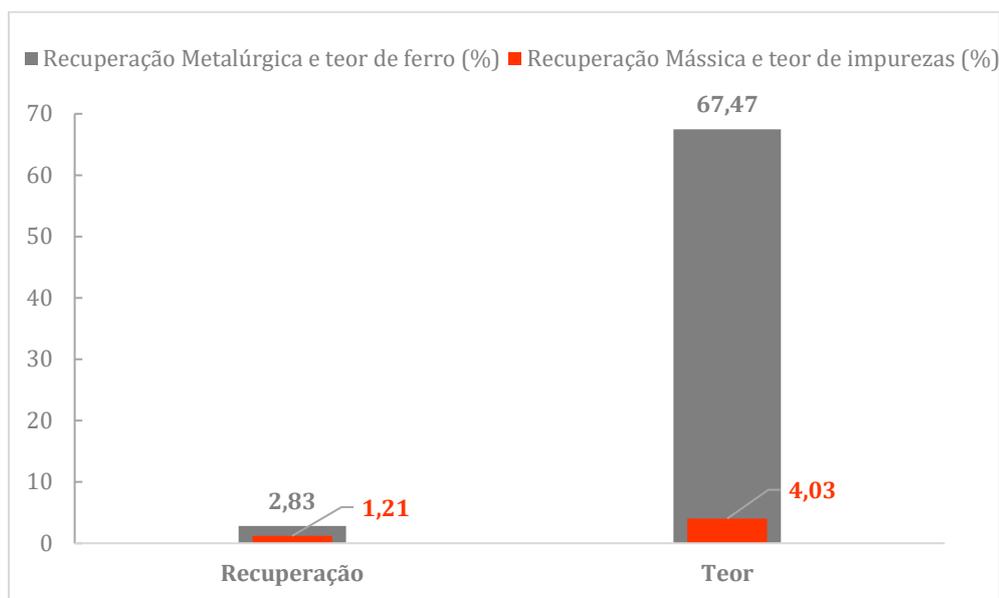


Fonte: Autor, 2024

O teste de separação magnética de baixa intensidade (1700 Gauss) para o rejeito C não foi capaz de produzir um concentrado, confirmando que esse rejeito não pode ser reprocessado com intensidades baixas de campo magnético.

O teste com 7000 G de intensidade produziu resultados muito semelhantes aos alcançados em bancada, com 1,21% de recuperação mássica, 67,47% de teor de ferro e 4,03% de impurezas. Entretanto, apesar dos valores de qualidade estarem dentro do objetivo, a massa recuperada não justifica o reprocessamento deste material por separação magnética. Vale destacar que o rejeito C passou por duas etapas de separação magnética no fluxograma original, e apresenta o menor teor de magnetita e maior teor de goethita. É provável que a maioria do ferro recuperável por separação magnética já tenha sido extraída no fluxograma original. Os valores do concentrado deste teste estão apresentados na Figura 28.

Figura 28 - Resultados do ensaio de concentração com separador magnético de tambor de 7000 G para o rejeito C



Fonte: Autor, 2024

Após os testes em escala de laboratório e em planta piloto, foi possível observar que, apesar dos testes com maior intensidade de campo magnético produzirem concentrados com maiores valores de recuperação mássica e, em geral, melhor qualidade, a separação magnética de baixa e média intensidade de campo não é uma rota viável de reprocessamento para os rejeitos A, B e C, não alcançando valores satisfatórios de massa e teor. Testes com separação magnética de alta intensidade foram realizados, mas estes se encontram fora do escopo deste trabalho.

5.3 Ensaio de Flotação

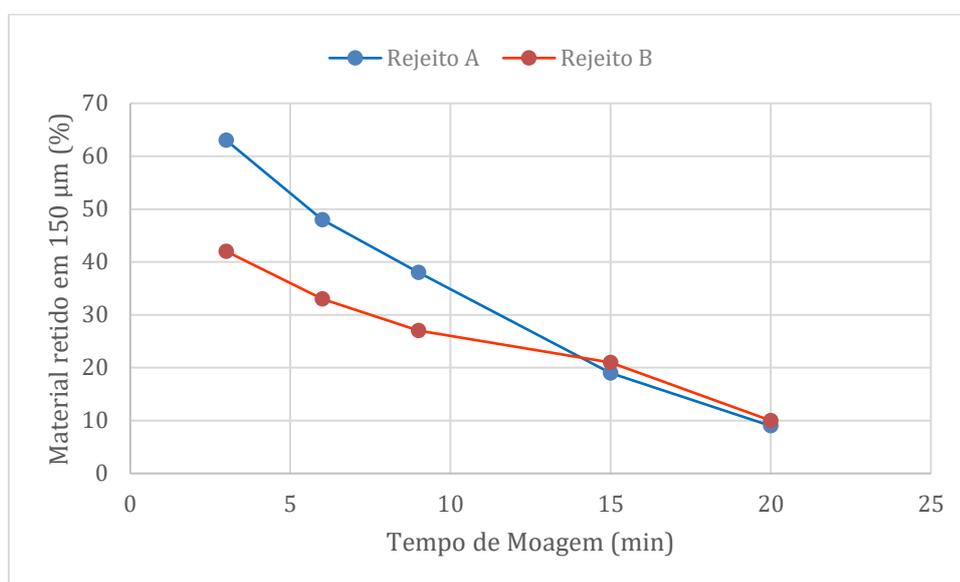
Os resultados dos ensaios de flotação são apresentados a seguir.

5.3.1 Preparação dos rejeitos A e B (moagem e deslamagem)

Como os rejeitos A e B não se encontravam na faixa ideal de aplicação da flotação – entre 10 e 150 μm – indicada por Lima e Valadão (2008), foi necessário moer os dois rejeitos pré-flotação. A Figura 29 apresentam os resultados dos testes de moagem realizados, mostrando a quantidade de material retido na peneira de 150

μm após 3, 6, 9, 15, e 20 minutos de moagem. Lima e Valadão (2008) indicam que o ideal para flotação é que o material possua não mais que 10% de material retido em 150 μm .

Figura 29 - Resultados dos testes de moagem para os rejeitos A e B



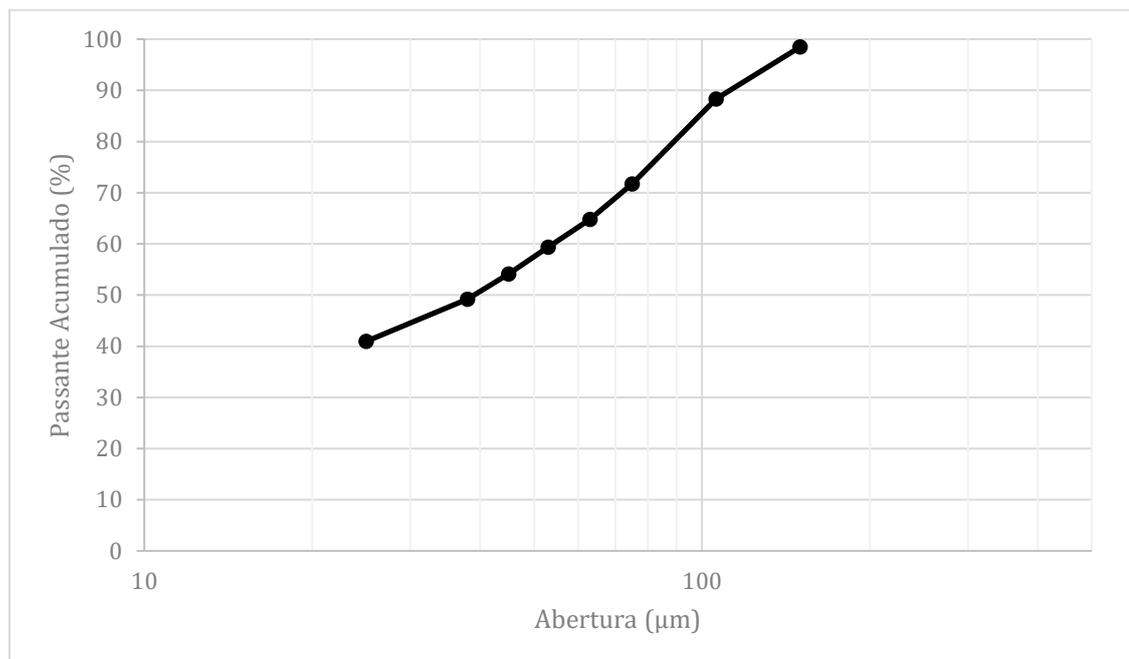
Fonte: Autor, 2024

Para os dois rejeitos, foram necessários 20 minutos de moagem para que a porcentagem retida em 150 μm fosse igual ou menor que 10%. Como o tempo foi o mesmo para os dois testes, considerando a alta quantidade de energia utilizada na etapa de moagem, foi decidido moer os dois rejeitos juntos, considerando as proporções com que os dois rejeitos são gerados no fluxograma original.

Para corroborar essa decisão, os rejeitos A e B foram combinados e moídos juntos por 20 minutos. Após esse tempo de moagem, o material passou por uma peneira de abertura igual a 150 μm , constatando-se que menos de 10% da massa ficou retida na peneira.

A Figura 30 apresenta a curva de distribuição granulométrica do material moído. O material apresentou 40,95% da massa passante em 25 μm .

Figura 30 - Distribuição granulométrica do produto da moagem da mistura dos rejeitos A e B após 20 minutos

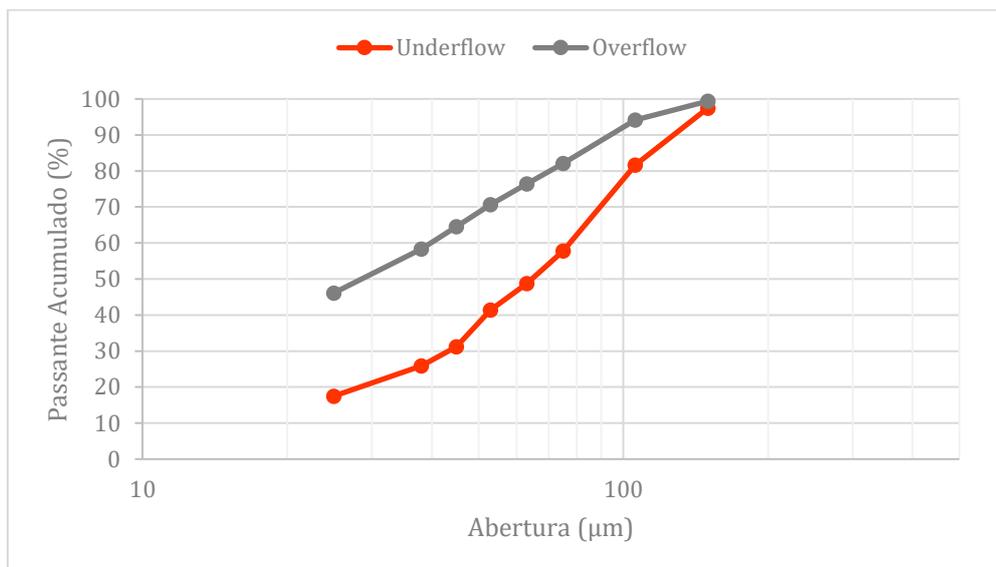


Fonte: Autor, 2024

O elevado valor de partículas abaixo de 25 μm indica a necessidade de deslamagem desse material antes dos testes de flotação, uma vez que a presença significativa de partículas finas (lamas) pode ser prejudicial ao processo. Estudos realizados por Rabelo (1994) *apud* Turrer (2007) indicam que a presença de lamas no processo de flotação pode levar a consideráveis perdas de ferro para o rejeito, além de aumentar a presença de sílica no concentrado. Além disso, Lima e Valadão (2008) esclarecem que um “[...] amplo gradiente de tamanhos de partículas pode comprometer a seletividade do processo, dadas suas possíveis diferenças de comportamento (hidrofobicidade, área superficial específica, peso, etc.)” (Lima e Valadão, 2008, p. 474). Além da literatura, testes anteriores de flotação com estes mesmos rejeitos indicam resultados inferiores quando não é feita deslamagem prévia do material.

A Figura 31 apresenta as curvas de distribuição granulométrica do *underflow* e do *overflow*. Como era esperado, o *overflow* concentrou mais partículas finas que o *underflow*. O *underflow* apresentou d_{50} igual a 64,62 μm e d_{80} igual a 103,87 μm, enquanto o *overflow* apresentou d_{50} igual a 28,85 μm e d_{80} igual a 70,40 μm.

Figura 31 - Distribuição granulométrica dos produtos da deslamagem da mistura moída dos rejeitos A e B



Fonte: Autor, 2024

Analisando os resultados, verifica-se que a operação de deslamagem atingiu o objetivo de retirar parte das partículas finas do material que foi destinado à flotação. Entretanto, o *overflow* também transportou partículas mais grossas (maiores que 25 μm), indicando uma perda de eficiência da operação. Isso pode ser atribuído à metodologia empregada para a deslamagem, devido a limitação de equipamentos disponíveis. A utilização da célula de flotação em vez de um equipamento específico de deslamagem pode explicar o corte mais grosseiro no material destinado ao *overflow*. Mesmo assim, observou-se uma diminuição na quantidade de partículas passantes em 25 μm , de 40,95% no produto moído para 17,48% no *underflow*.

A Tabela 14 apresenta os valores de análise química da alimentação da deslamagem (material moído), bem como dos produtos *underflow* e *overflow*. 29,25% da massa alimentada foi direcionada ao *overflow*.

Tabela 14 - Resultado da deslamagem da mistura moída dos rejeitos A e B

Amostra	Partição (%)	Recuperação Metálica (%)	Composição química (%)					Densidade (g/cm ³)
			Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	
Alimentação	100,00	100,00	21,06	67,13	0,48	0,03	0,05	3,13
Overflow	29,25	29,98	20,15	67,56	0,72	0,02	0,04	3,08
Underflow	70,75	72,02	21,44	66,95	0,38	0,04	0,05	3,16

Fonte: Autor, 2024

As Tabelas 15 e 16 apresentam as análises granuloquímicas do *overflow* e do *underflow*. Nota-se que o *underflow* possui teor de ferro superior ao *overflow* e menor teor de sílica em todas as faixas granulométricas. Isso sugere que, apesar das perdas de ferro de quase 30% e de partículas grosseiras para o *overflow*, houve um enriquecimento do *underflow*, indicando a remoção de parte da sílica durante a deslamagem. No *overflow*, a fração passante em 25 µm, também sendo a fração com maior massa, exibe o maior teor de ferro.

Tabela 15 – Análise granuloquímica do *overflow* da deslamagem dos rejeitos A e B

Fração (µm)	% retida	Composição química (%)					Distribuição (%)	
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	Fe	SiO ₂
150-75	26,4	9,73	85	0,16	0,013	0,01	8,65	22,53
63-53	16,9	12,18	82,20	0,22	0,018	0,02	6,93	13,95
45-25	24,49	14,82	77,10	0,31	0,029	0,02	18,01	27,95
-25	46,13	29,01	52,10	1,28	0,0116	0,06	66,41	35,57
Global	100,00	20,15	67,57	0,72	0,02	0,05	100,00	100,00

Fonte: Autor, 2024

Tabela 16 - Análise granuloquímica do *underflow* da deslamagem dos rejeitos A e B

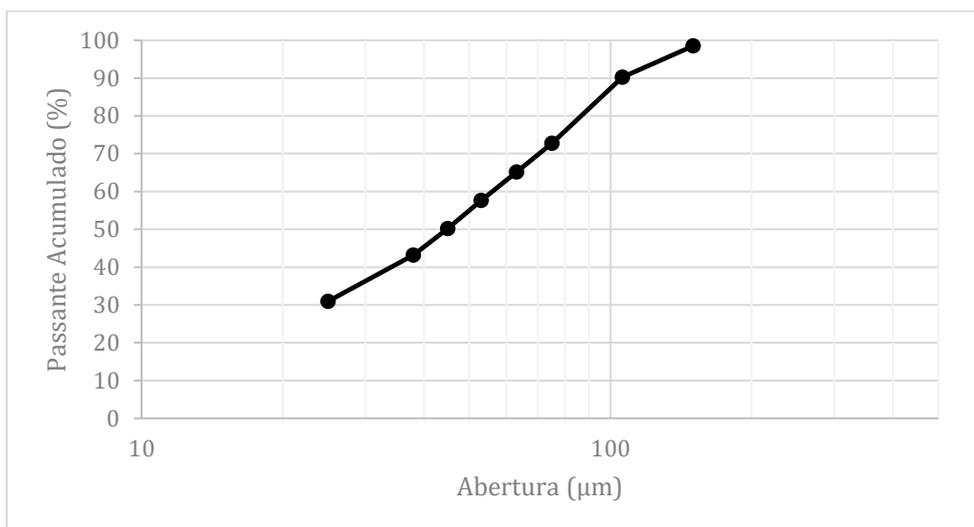
Fração (μm)	% retida	Composição química (%)					Distribuição (%)	
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	Fe	SiO ₂
150-75	42,18	19,58	71,20	0,16	0,018	0,02	38,52	44,86
63-53	16,39	20,71	69,10	0,21	0,023	0,02	15,83	16,92
45-25	23,95	20,53	69,4	0,30	0,03	0,03	22,93	24,83
-25	17,48	27,87	51,30	1,18	0,134	0,16	22,72	13,39
Global	100,00	21,44	66,95	0,38	0,04	0,04	100,00	100,00

Fonte: Autor, 2024

5.3.2 Ensaios de flotação em bancada

O *overflow* proveniente da deslamagem foi descartado, enquanto o *underflow* seguiu para a etapa subsequente. Esse *underflow* foi misturado com o rejeito C, respeitando o balanço de massa do fluxograma original, nas proporções indicadas no item 3.4, para formar a alimentação da flotação. A Figura 32 apresenta a distribuição granulométrica da alimentação, que possuía d_{50} igual a 44,78 μm e d_{80} igual a 87,39 μm .

Figura 32 - Distribuição granulométrica da alimentação da flotação



Fonte: Autor, 2024

As Tabelas 17, 18 e 19 apresentam os resultados dos testes de flotação 1, 2 e 3.

Tabela 17 - Resultados do teste de flotação 1 (100 g/t de amina)

Amostra	Recuperação mássica (%)	Composição química (%)						Densidade (g/cm ³)
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	PPC	
Alimentação	100,00	24,98	61,27	0,67	0,06	0,04	2,57	3,20
Concentrado	73,83	31,59	51,30	0,74	0,08	0,05	2,90	3,36
Rejeito	26,17	6,33	89,40	0,46	0,03	0,02	1,83	2,81

Fonte: Autor, 2024

Tabela 18 - Resultados do teste de flotação 2 (300 g/t de amina)

Amostra	Recuperação mássica (%)	Composição química (%)						Densidade (g/cm ³)
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	PPC	

Alimentação	100,00	25,09	60,87	0,62	0,06	0,04	2,57	3,20
Concentrado	34,55	59,92	7,38	1,18	0,14	0,09	4,89	4,34
Rejeito	65,45	6,71	89,10	0,33	0,02	0,01	0,94	2,81

Fonte: Autor, 2024

Tabela 19 - Resultados do teste de flotação 3 (500 g/t de amina)

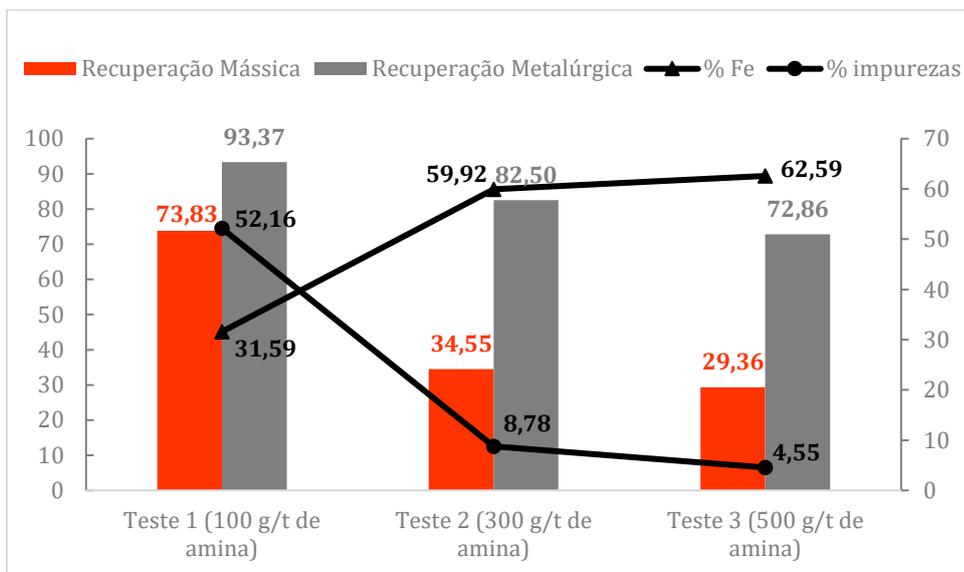
Amostra	Recuperação mássica (%)	Composição química (%)						Densidade (g/cm ³)
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	PPC	
Alimentação	100,00	25,22	60,52	0,68	0,07	0,04	2,57	3,20
Concentrado	29,36	62,59	3,05	1,26	0,15	0,09	5,44	4,44
Rejeito	70,64	9,69	84,40	0,44	0,03	0,02	1,17	2,86

Fonte: Autor, 2024

Os valores elevados de perda por calcinação (PPC) e Al₂O₃ nos três concentrados podem ser explicados pela presença de goethita, conforme indicado na caracterização dos rejeitos. Segundo Lipper e Peres (2014), minérios goethíticos podem apresentar contaminações altas de Al₂O₃ e PPC.

Observou-se que a recuperação mássica diminuiu com o aumento da dosagem de coletor, mas a qualidade do concentrado aumentou. A Figura 33 apresenta as recuperações mássicas e metalúrgicas dos três concentrados e os teores de ferro e de impurezas.

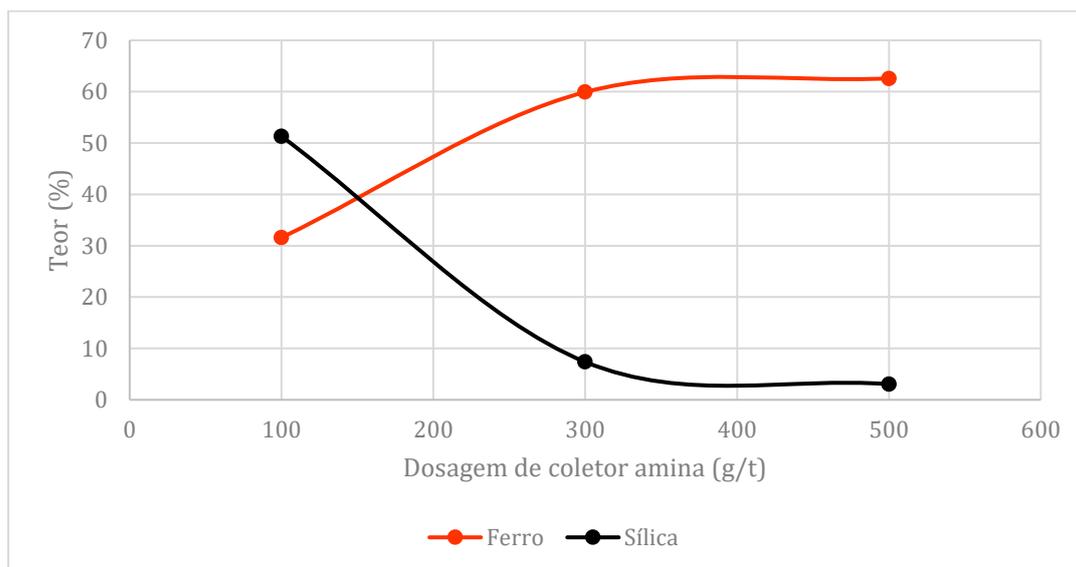
Figura 33 – Recuperação mássica e metalúrgica e teores de ferro e sílica dos três concentrados dos testes de flotação



Fonte: Autor, 2024

Os resultados indicaram que o teor de ferro aumentou com a dosagem de coletor, enquanto o teor de impurezas diminuiu, atingindo valores inferiores a 5% para o teste 3, com a dosagem mais elevada (500 g/t). Os índices de seletividade foram iguais a 2,95 para o teste 1, 10,38 para o teste 2 e 13,37 para o teste 3. Nota-se que a seletividade aumentou com o aumento da dosagem de coletor, ou seja, ao se aumentar a dosagem, aumentou-se a recuperação dos minerais portadores de ferro no concentrado em relação ao rejeito, e a recuperação dos minerais de ganga no rejeito em relação ao concentrado. A Figura 34 apresenta a relação entre o teor de ferro e sílica do material e a dosagem de amina.

Figura 34 - Relação entre dosagem de coletor e teores de ferro e sílica



Fonte: Autor, 2024

Foi possível perceber que os teores de ferro e sílica nos concentrados dos testes 2 e 3 são semelhantes, com pouca variação ao alterar a dosagem de 300 g/t para 500 g/t. Isso sugere que os resultados obtidos com 500 g/t podem ser atingidos com dosagens menores, como 400 g/t, potencialmente resultando em uma redução no consumo de reagente. No entanto, essa hipótese ainda precisa de testes adicionais para confirmação.

Nota-se que a meta de qualidade do estudo foi atingida para dosagens consideravelmente altas de amina, que não são comumente usadas industrialmente, ou na literatura, considerando as dosagens aplicadas por Matos (2022), Rocha (2017), Lopes (2009) e Bicalho (2019). Normalmente, a dosagem de amina aplicada varia em torno de 50, 100 e 150 g/t. Entretanto, quando a dosagem de 100 g/t foi aplicada ao rejeito estudado, não foi possível obter um concentrado com os teores esperados de ferro e sílica, esses só foram atingidos com dosagens elevadas.

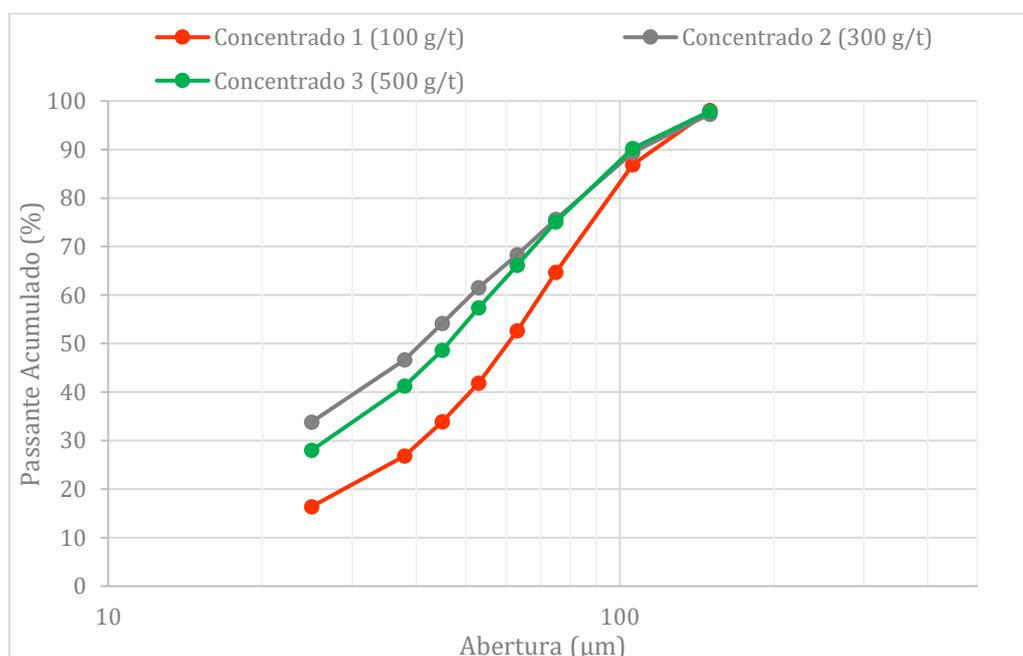
Além disso, nos três testes, a recuperação de sílica no flotado continua a aumentar com o aumento da dosagem de amina, sendo 38,18% para o teste com 100 g/t, 95,81% para o teste com 300 g/t e 98,52% para o teste com 500 g/t. Isso indica que não foi atingida a concentração de amina na polpa necessária para o início da formação de hemimicelas. Desta forma, apesar da dosagem ser alta e não usual, o ponto crítico de concentração de amina ainda não foi atingido, portanto essa dosagem

não é prejudicial à flotação. Como, neste estudo, foi avaliada apenas a etapa *rougher* de concentração, uma alternativa para a alta dosagem de amina seria estagiá-la em etapas *rougher*, *cleaner* e *re-cleaner*. Testes adicionais devem ser realizados para confirmar essa hipótese.

Outra alteração possível, que pode ser estudada, é a remoção do reagente espumante Montanol 800. Considerando que a amina, além de agir como coletor, também pode agir como espumante, a presença do Montanol pode ter gerado interação entre a ação dos dois reagentes, causando um possível efeito antagônico e prejudicando a ação da amina. Testes adicionais sem adição de Montanol 800, ou diminuindo sua dosagem, são necessários para entender essa interação e comprovar essa hipótese.

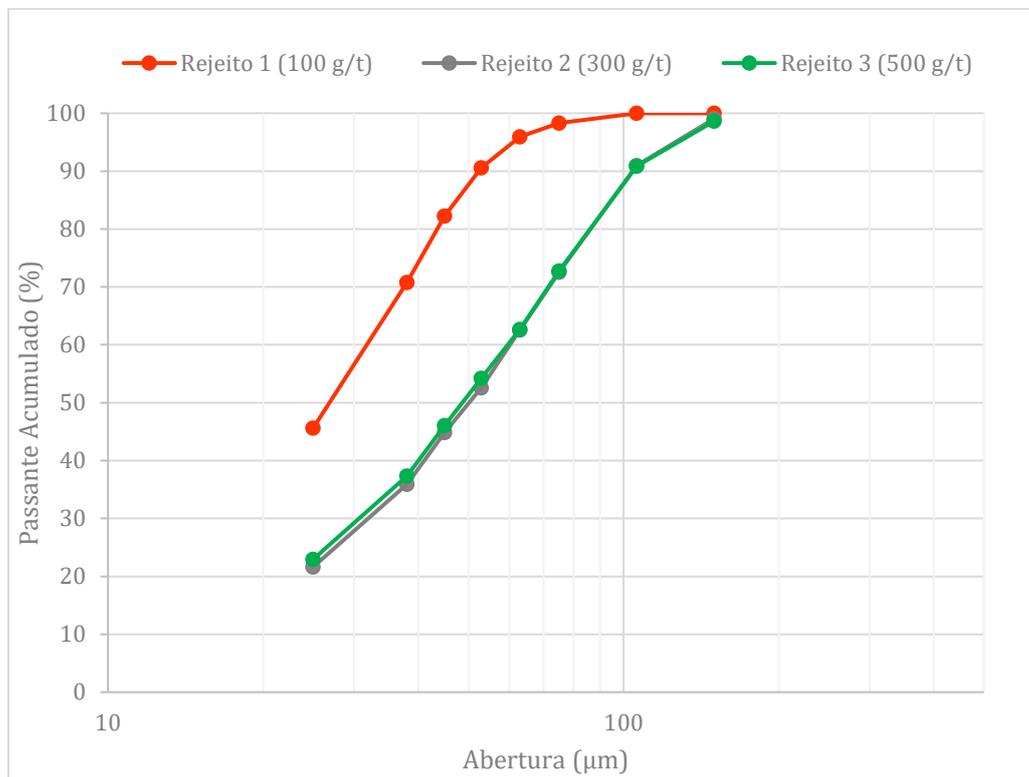
Em relação à granulometria, os três concentrados apresentaram distribuições granulométricas semelhantes, sendo o concentrado 1 o mais grosso entre os três (Figuras 35 e 36). Os rejeitos 2 e 3 apresentaram distribuição granulométrica bastante semelhante. A diferença dos produtos gerados no Teste 1 pode ser explicada pela baixa dosagem de coletor, resultando na flotação apenas das partículas mais finas e mais leves.

Figura 35 - Distribuição granulométrica dos concentrados dos testes de flotação



Fonte: Autor, 2024

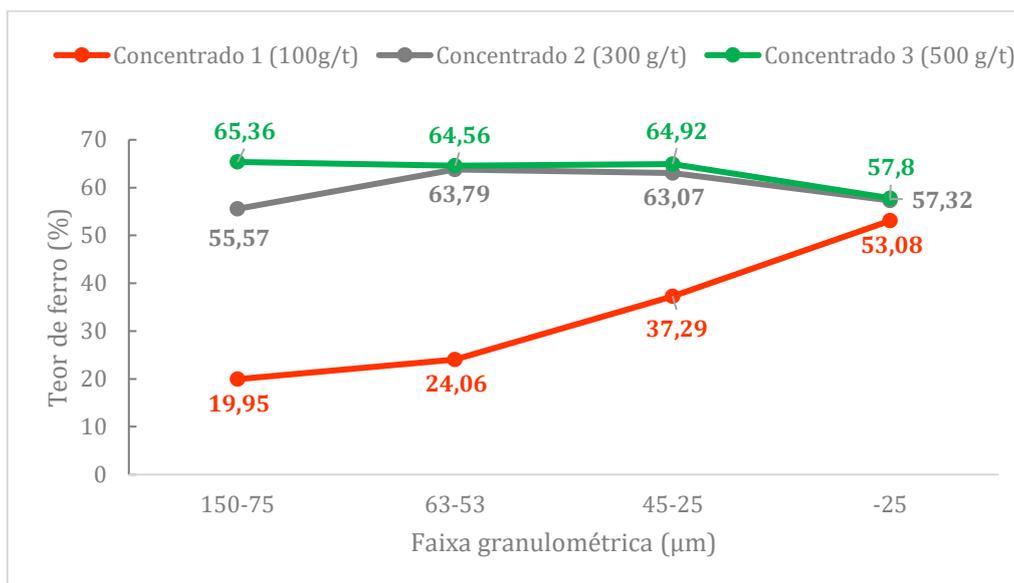
Figura 36 - Distribuição granulométrica dos rejeitos dos testes de flotação



Fonte: Autor, 2024

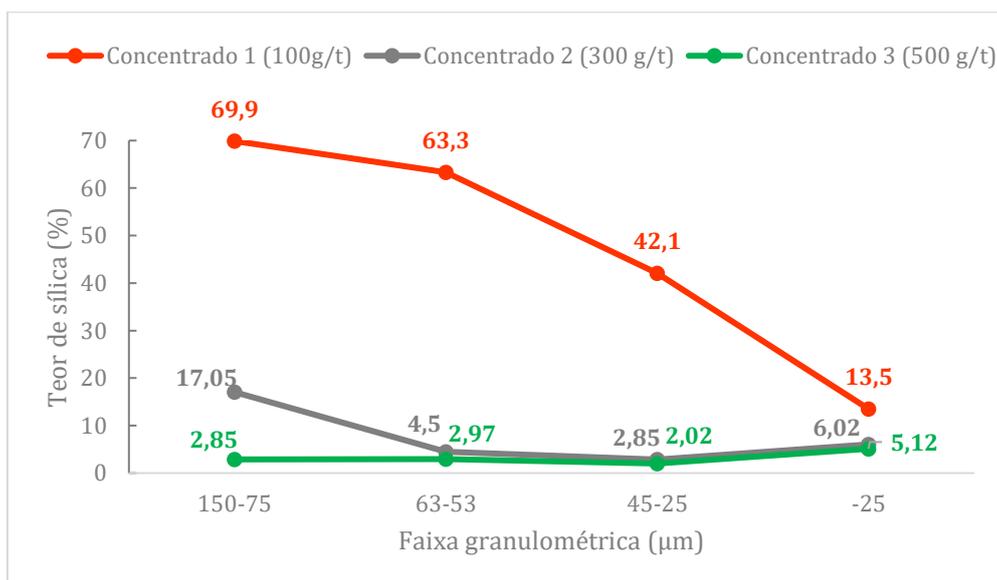
As Figuras 37 e 38 apresentam os teores de ferro e sílica por faixa granulométrica dos três concentrados.

Figura 37 - Teor de ferro por faixa granulométrica dos concentrados dos testes de flotação



Fonte: Autor, 2024

Figura 38 - Teor de sílica por faixa granulométrica dos concentrados dos testes de flotação



Fonte: Autor, 2024

Foi possível perceber que os concentrados 2 e 3 possuem teores de ferro e sílica muito semelhantes em todas as faixas granulométricas, com exceção da faixa mais grosseira (150-75 µm). É possível observar, então, que o aumento na dosagem não afetou o teor das frações mais finas da alimentação, que já havia sido

previamente deslamada, retirando-se as partículas ultrafinas. O aumento foi, entretanto, necessário para remover mais sílica da fração mais grosseira.

Essa observação sugere que seria possível atingir resultados comparáveis ao concentrado 3 utilizando-se uma dosagem menor de coletor, se a alimentação fosse previamente dividida em duas frações granulométricas, com o corte sendo feito em 75 μm , e as duas frações fossem flotadas separadamente. Essa hipótese é corroborada pelos estudos de Lima e Valadão (2008), que mostraram que é possível melhorar o desempenho da flotação ao se processar frações granulométricas separadamente. Dessa forma, sugere-se um estudo cinético para verificar a influência da granulometria da alimentação da flotação na recuperação da sílica, a fim de indicar as melhores condições físico-químicas de flotação para cada fração granulométrica. De qualquer forma, os concentrados 2 e 3 comprovam a viabilidade de reprocessar os rejeitos de minério de ferro dessa planta por meio de flotação, com o concentrado 3 alcançando os valores de recuperação mássica e de teores de ferro e impurezas visados nesse estudo.

5.4 Ensaio de Recirculação do Rejeito A

A Tabela 21 apresenta os resultados do ensaio de recirculação do rejeito A no fluxograma original. A alimentação é composta pela mistura do rejeito A com o *underflow* do ciclone do fluxograma original, que é então direcionada para um separador magnético de média intensidade.

Tabela 20 - Resultados do ensaio de recirculação do rejeito A no fluxograma original

Amostra	Recup. Mássica (%)	Recup. Metálica (%)	Composição química (%)					Densidade (g/cm ³)
			Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	
Alimentação	100,00	100,00	34,78	46,74	0,81	0,09	0,06	3,44
Concentrado	21,65	37,87	60,83	12,50	0,29	0,05	0,05	4,67
Rejeito	78,35	62,13	27,58	56,20	0,95	0,10	0,06	3,22

Fonte: Autor, 2024

A tentativa de recirculação não alcançou o desempenho almejado, uma vez que o concentrado gerado não atingiu a qualidade desejada. Embora a recirculação tenha aumentado a recuperação de massa no separador magnético de média intensidade do fluxograma original (de 16,8% para 21,65%), também resultou em um aumento significativo no teor de sílica no concentrado, passando de 3,7% no concentrado original para 12,5% no concentrado da recirculação. Isso indica que, para produzir um concentrado com qualidade semelhante à do fluxo original, seria necessário adicionar uma nova etapa de concentração, o que contradiz o propósito inicial de tentar recircular a massa sem a necessidade de adicionar novas etapas ao fluxo. Desse modo, pode-se assumir que a tentativa de recircular a massa no fluxograma original não foi uma opção viável de reprocessamento do rejeito.

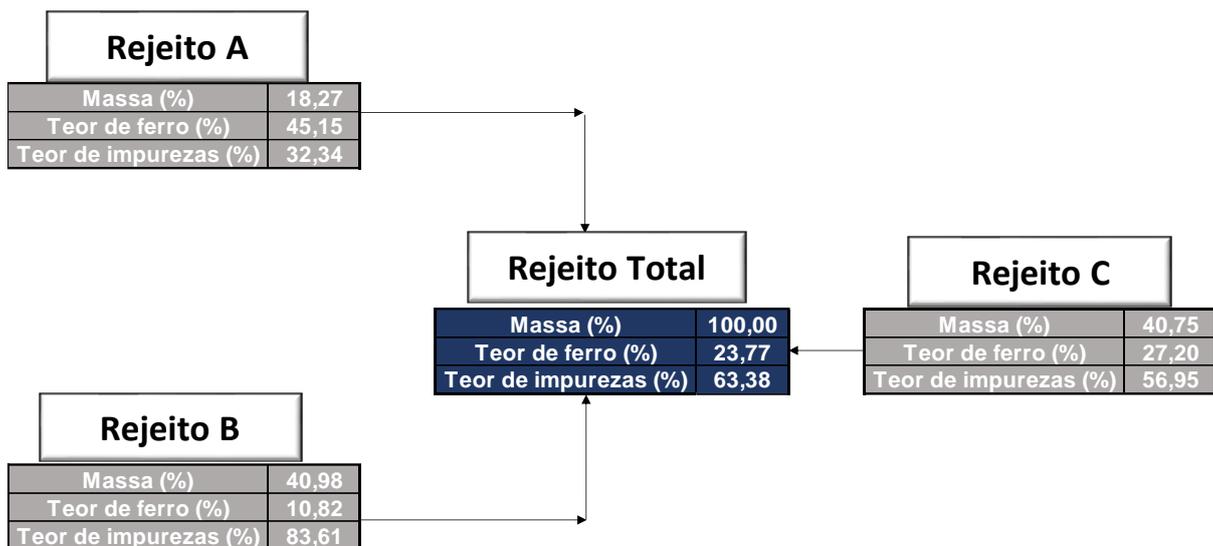
5.5 Reprocessamento do rejeito e balanço de massa final

Realizados todos os testes, foi selecionado aquele que atingiu os objetivos de massa e teor estabelecidos para o cálculo de um balanço de massa final. O teste selecionado foi a flotação realizada com 500 g/t de amina.

a) Composição do rejeito

A Figura 39 apresenta a porcentagem em massa, teor de ferro e impurezas de cada rejeito, bem como o rejeito total formado pela mistura dos três.

Figura 39 – Porcentagem em massa e teores de ferro e impurezas dos rejeitos usados no estudo, e do rejeito total formado pela mistura dos três

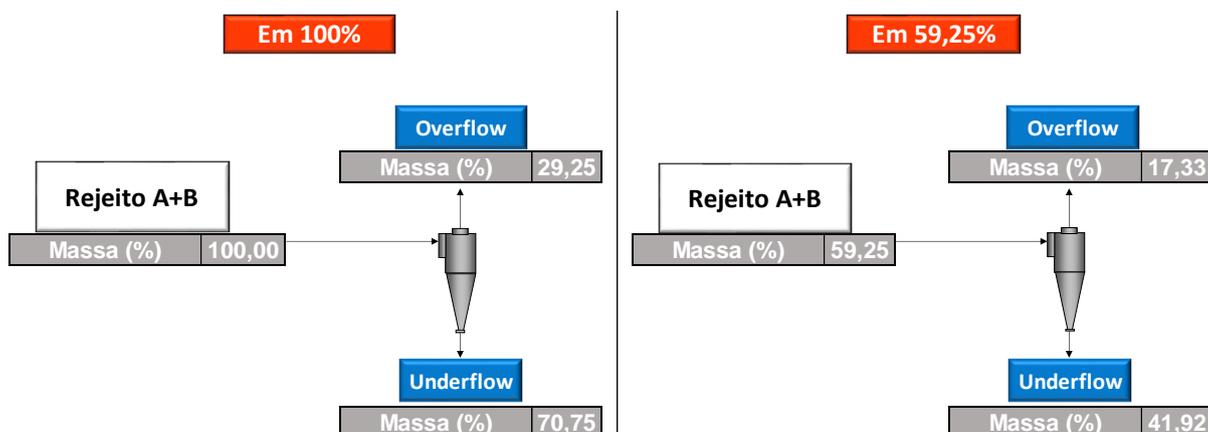


Fonte: Autor, 2024

b) Deslamagem dos Rejeitos A e B

A soma dos rejeitos A e B representavam 59,25% da massa total. Na deslamagem, 29,25% da massa total alimentada foi direcionada ao *overflow*. Dessa forma, no conjunto dos rejeitos (59,25% da massa total), o *overflow* correspondeu a 17,33% (Figura 40).

Figura 40 - Partição de massa do ensaio de deslamagem dos rejeitos A e B

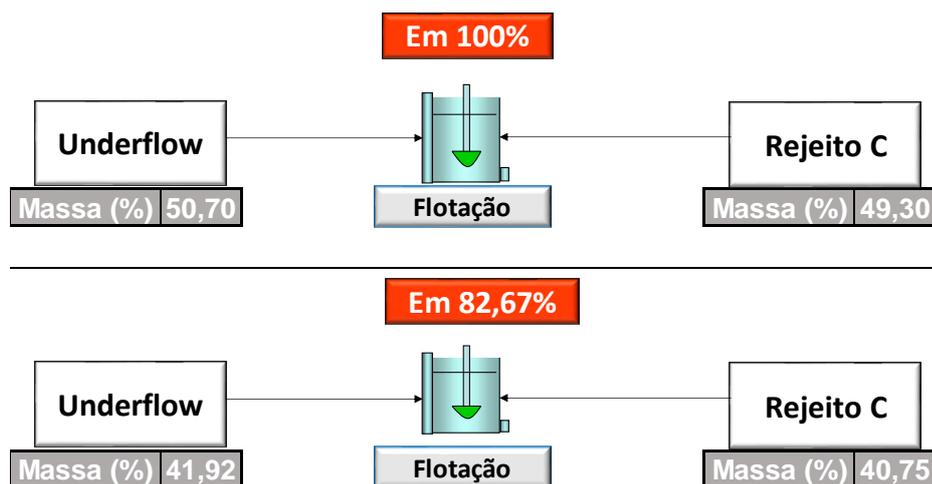


Fonte: Autor, 2024

c) Flotação

Com 17,33% da massa total perdida para o overflow, 82,67% do rejeito foi direcionado para a flotação, dividindo-se em 41,92% de *underflow* da deslamagem dos rejeitos A e B, e 40,75% do rejeito C, como indicado na Figura 41.

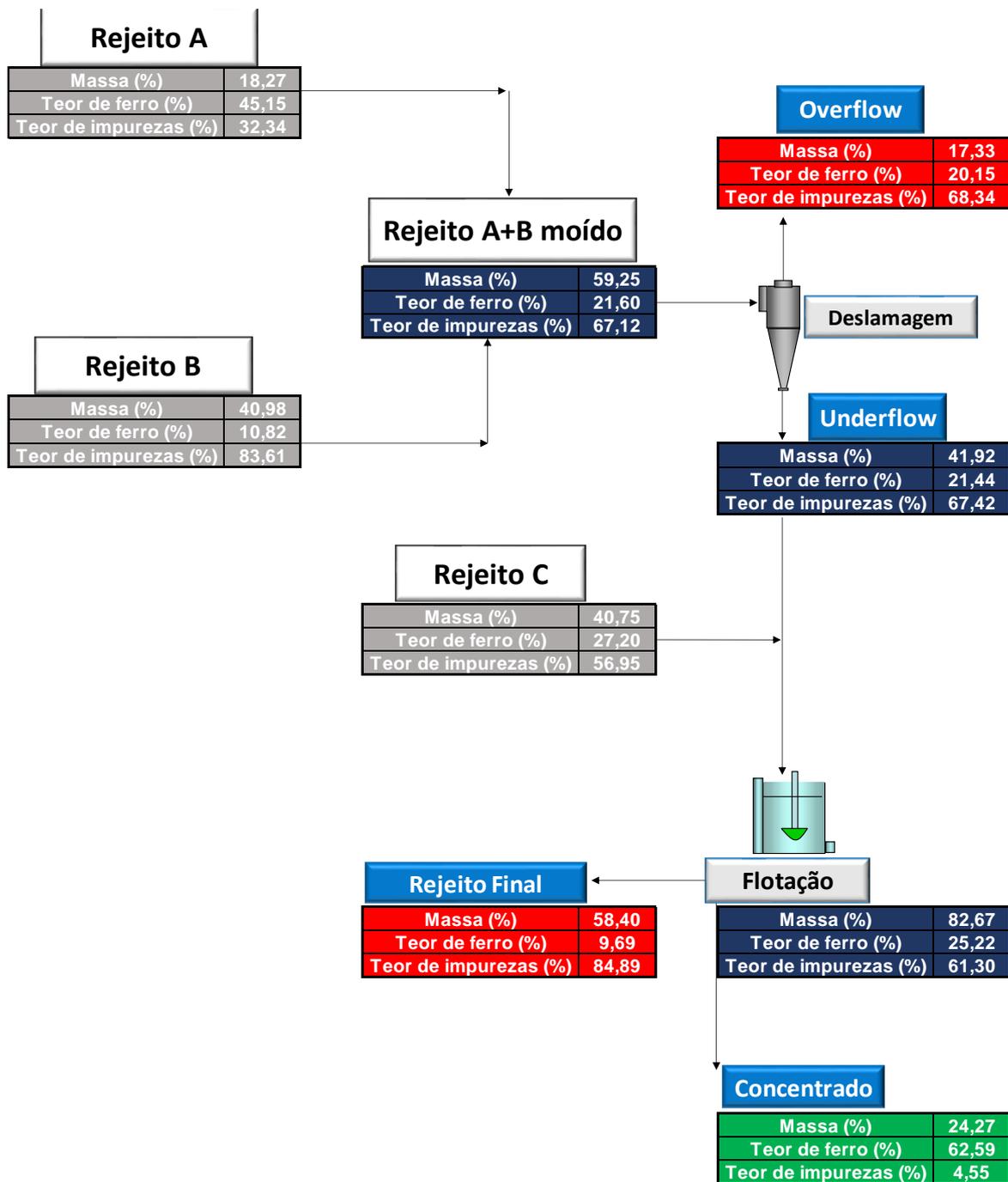
Figura 41 - Composição mássica da alimentação dos testes de flotação



Fonte: Autor, 2024

Na flotação, foi recuperada 29,36% da massa alimentada. Em 82,67%, foram recuperados 24,27% da massa. A Figura 42 apresenta o balanço de massa final.

Figura 42 - Balanço de massa do reprocessamento dos rejeitos A, B e C, considerando os resultados de moagem, deslamagem e flotação com 500 g/t de amina



Fonte: Do Autor, 2024

Dessa forma, foi possível recuperar 24,27% da massa total de rejeito, com uma qualidade de 62,59% de ferro e 4,55% de impurezas. O rejeito final (overflow + rejeito da flotação) apresentou 11,67% de ferro e 80,02% de sílica.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos deste trabalho foram alcançados a partir de flotação catiônica reversa nos três rejeitos, utilizando uma dosagem de 500 g/t do coletor amina. Este teste resultou na recuperação de 24,27% da massa total do rejeito e na obtenção de um concentrado com 62,59% de ferro e 4,55% de impurezas, diminuindo o teor de ferro do rejeito final de 23,77% para 11,67%.

Os resultados da flotação indicam a necessidade de dosagens elevadas e pouco comum de amina na indústria, especialmente para a fração mais grosseira (150 a 75 μm), que requer uma dosagem maior do que a fração fina (menor que 75 μm) para a remoção do quartzo na espuma. Portanto, a divisão deste rejeito em duas ou mais frações granulométricas permitiria a adequação da dosagem de amina considerando o comportamento de cada fração, otimizando o processo de flotação e aumentando a coleta da sílica, produzindo um concentrado mais puro.

Quanto às limitações identificadas, a separação magnética de média intensidade não se mostrou adequada para reprocessamento das amostras de rejeito que já foram previamente processados por esse método, como foi o caso do rejeito C, ou para as amostras com baixo teor de ferro e alto teor de sílica, como o rejeito B. Outra limitação foi observada na etapa de deslamagem onde, devido às limitações de equipamentos específicos de deslamagem disponíveis, foram direcionadas ao overflow mais partículas grosseiras do que o desejado, o que diminuiu a eficiência da deslamagem.

Para estudos futuros, sugere-se a moagem prévia do rejeito A antes da separação magnética de média intensidade, além da adição de um estágio *cleaner* de concentração para esse rejeito. Para a flotação, deve ser avaliada a influência da distribuição granulométrica da alimentação na recuperação da sílica no flotado, de forma a otimizar as condições de ensaio e aumentar a eficiência da operação. Também pode-se avaliar o efeito de estagiar a dosagem de amina em estágios *rougher* e *cleaner* de concentração.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Relatório de segurança de barragens, 2022**. Brasília: ANA, 2023. 90 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas, ano base 2021**. Brasília: ANM, 2023. 23 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). **Produção Mineral**: dados da produção bruta, beneficiada e comercializada, investimentos e CFEM. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/producao-mineral>. Acesso em: 25 jan. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Altera a Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, e dá outras providências. Resolução n. 130, de 24 de fevereiro de 2023. **Lex**: Publicação – Diário Oficial da União de 27 de fevereiro de 2023, Edição 39, Seção 1, p.69.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Dispõe sobre procedimentos para o aproveitamento de rejeitos e estéreis. Resolução n. 85, de 2 de dezembro de 2021. **Lex**: Publicação – Diário Oficial da União de 7 de dezembro de 2021, Edição 229, Seção 1, Página 71.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **NRM 18: Beneficiamento**. Brasília, 2001. AGUIAR, Felipe Leonardo de. **Redução do Impacto Ambiental Através da Recuperação dos Ultrafinos de Minério de Ferro - Uma Revisão**. 2013. 73 f. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Minerais) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

ANDRADE, Wellington Fernando de. **Beneficiamento De Minério De Ferro**: a importância da caracterização tecnológica na definição de rota de processo. 2018. 45 f. TCC (Graduação em Engenharia de Minas) - Fundação Presidente Antônio Carlos de Conselheiro Lafaiete, Conselheiro Lafaiete, 2018.

ARAUJO, Cecília Bhering de. **Contribuição Ao Estudo Do Comportamento De Barragens De Rejeito De Mineração De Ferro**. 2006. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BALTAR, Carlos Adolpho Magalhães. **Flotação em nova abordagem**. Recife: Editora UFPE, 2021. 537 p.

BALTAR, Carlos Adolpho Magalhães. **Flotação no Tratamento de Minérios**. 2. ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2010. 232 p.

BICALHO, Leandro Seixas. **Flotação De Minério De Ferro Dolomítico**. 2019. 118 f. Dissertação (Mestrado em Curso de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

BRASTORNO (Brasil). **LOOPBRAS - Loop de ciclonagem**. 2023. Disponível em: <https://brastorno.com.br/equipamentos-mineracao/loopbras-loop-de-ciclonagem/>. Acesso em: 20 dez. 2023.

BULATOVIC, Srdjan M. **Handbook of Flotation Reagents: chemistry, theory and practice: flotation of sulfide ores**. Elsevier Science & Technology Books, 2007. 448 p.

CARMIGNANO, Ottavio Raul Domenico Riberti. **Inovação no setor de mineração de ferro em Minas Gerais com foco na destinação de rejeitos**. 2021. 113 f. Tese (Doutorado em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

CARMIGNANO, Ottávio; VIEIRA, Sara; TEIXEIRA, Ana Paula; LAMEIRAS, Fernando; BRANDÃO, Paulo Roberto; LAGO, Rochel. Iron Ore Tailings: characterization and applications. **Journal Of The Brazilian Chemical Society**, [S.L.], v. 32, n. 10, p. 1895-1911, out. 2021. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20210100>.

CARVALHO, Pedro Sergio Landim de; SILVA, Marcelo Machado; ROCIO, Marco Aurélio; MOSZKOWICZ, Jacques. Minério de Ferro. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 39, p. 197-233, mar. 2014. Semestral.

CASTRO, Elias Fonseca de. **Produção de Pellet Feed a Partir de Lamas**. 2012. 92 f. Dissertação (Mestrado em Curso de Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

CAXITO, Fabrício; DIAS, Tatiana Gonçalves. Ferro. In: PEDROSA-SOARES, Antônio Carlos; VOLL, Eliane; CUNHA, Edson Campos (org.). **Recursos Minerais de Minas Gerais Online: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, e meio ambiente e mineração em minas gerais**. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (Codemge), 2018. Cap. 10. p. 1-36. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/ferro/#principais-dep%C3%B3sitos-de-ferro-de-minas-gerais>. Acesso em: 10 dez. 2023.

CHAVES, Arthur Pinto; L. FILHO, Laurindo de Salles; BRAGA, Paulo Fernando A. Flotação. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves (ed.). **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: Cetem/McT, 2010. Cap. 11. p. 465-515.

DAUCE, Pedro Domingos. **Caracterização Tecnológica De Rejeito De Jigagem De Minério De Ferro**. 2017. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

DWORZANOWSKI, M. Maximizing the recovery of fine iron ore using magnetic separation. **J. S. Afr. Inst. Min. Metall.**, Johannesburg , v. 112, n. 3, p. 197-202, Mar. 2012. Disponível em:
http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532012000300010&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 15 dez. 2023.

FARIA, Andréia da Conceição de. **Tijolo Prensado Produzido Com Rejeito De Barragem De Minério De Ferro**. 2023. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia das Construções) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, Daniel; PIÑUELA-NOVAL, Juan; VERDEJA, Luís Felipe. Iron Ore Agglomeration Technologies. In: SHATOKHA, Volodymyr (ed.). **Iron Ores and Iron Oxide Materials**. [S. L.]: Intechopen, 2018. Cap. 4. DOI: 10.5772/intechopen.72546

FONTES, Wanna Carvalho. **Utilização Do Rejeito De Barragem De Minério De Ferro Como Agregado Reciclado Para Argamassas De Revestimento E Assentamento**. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (Minas Gerais). **Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração: Ano Base 2017**. Belo Horizonte: FEAM, 2018. 47 p.

GALVÃO, José Lucas Barros; ANDRADE, Humberto Dias; BRIGOLINI, Guilherme Jorge; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti; MENDES, Júlia Castro. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 200, p. 412-422, nov. 2018. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.313>.

GOMES, Ana Cláudia Franca; PAPINI, Risia Magriotis. Magnetic concentration route for recovering pellet feed fines stored in a mining dam. **Rem - International**

Engineering Journal, [S.L.], v. 75, n. 3, p. 267-274, set. 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672021750085>.

GOMES, Marcos Antônio. **Caracterização Tecnológica no Aproveitamento do Rejeito de Minério de Ferro**. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

GONZAGA, Ligia Mara. **Separação Magnética A Úmido De Minérios De Ferro Itabiríticos**. 2014. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

GUERRA, André Nillo Lopes Pires. **Caracterização E Utilização De Rejeito De Minério De Ferro Pellet Feed Em Pavimentos De Blocos Intertravados De Concreto**. 2014. 127 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014

LIMA, Neymayer Pereira; VALADÃO, Geoge Eduardo. Avaliação do efeito da granulometria no processo de flotação. **Rem**: Revista Escola de Minas, [S.L.], v. 61, n. 4, p. 473-477, dez. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0370-44672008000400011>.

LIPPER, Gunter Chaves; PERES, Antônio Eduardo Clark. Rota De Processo Para Concentração De Minérios De Ferro Hidratados. **Holos**, [S.L.], v. 3, p. 272-283, 3 jul. 2014. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2014.1763>.

LOPES, Gilmara Mendonça. **Flotação direta de minério de ferro**. 2009. 176 f. Dissertação (Mestrado em Curso de Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

LU, Liming (ed.). **Iron Ore: mineralogy, processing and environmental sustainability**. Elsevier Science & Technology Books, 2015.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antônio Freitas. Introdução Ao Tratamento De Minérios. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Sílvia Cristina A. (ed.). **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: Cetem/McT, 2010. Cap. 1. p. 3-20.

MATOS, Vanderson Eney de. **Propriedades de Espuma no Desempenho da Flotação Catiônica Reversa de Minério de Ferro**. 2022. 131 f. Tese (Doutorado

em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

MENDES, Beatryz C.; PEDROTI, Leonardo G.; FONTES, Mauricio P.F.; RIBEIRO, José Carlos L.; VIEIRA, Carlos M.F.; PACHECO, Anderson A.; AZEVEDO, Afonso R.G. de. Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 227, 116669, dez. 2019. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.050>.

MENDES, M. V. A.; SILVA, G. S. R.; GOMES, L. C.; SIQUEIRA, L. A.; SILVA, G. G.; PEREIRA, P. E. C. Revisão Sistemática: Separação Magnética No Processamento Mineral. **Holos**, [S. L.], v. 4, n. 37, p. 1-15, ago. 2021.

MENEZES, Késsius Bortolan. **Separação Magnética Do Rejeito Da Deslamagem Da Usina De Beneficiamento Da Serra Do Sapo Em Conceição Do Mato Dentro, Mg**. 2020. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

MITOV, I.; STOILOVA, A.; YORDANOV, B.; KRASSTEV, D. Technological research on converting iron ore tailings into a marketable product. **Journal Of The Southern African Institute Of Mining And Metallurgy**, [S.L.], v. 121, n. 5, p. 181-186, 2021. Academy of Science of South Africa. <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/1273/2021>.

MORAES, Sandra Lúcia de; MOTTA, Flávia Gutierrez; MASSOLA, Camila Peres; SACCOCCIO, Eduardo Maziero; JÚNIOR, Marsis Cabral. Rejeitos De Mineração: Um Olhar Do Cenário Brasileiro – Parte I: Cadeia Produtiva. In: SIMPÓSIO DE MINERAÇÃO, 18., 2017, São Paulo. **Anais [...]**, 2017. p. 228-240.

NOGUEIRA, André; VIEGAS, Braulio. Produção De Pellet Feed Por Flotação Com Alimentação 100% Composta De Rejeitos Provenientes De Barragem E Pilhas De Estoque. In: SIMPÓSIO DE MINERAÇÃO, 19., 2018, São Paulo. **Anais [...]**, 2018. p. 115-123.

NOGUEIRA, Francielle Câmara. **Agregação Hidrofóbica Aplicada Ao Beneficiamento De Finos De Minério De Ferro**. 2019. 132 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

OLIVEIRA, Ana Claudia da Costa. **Levantamento De Dados De Geologia, Métodos De Lavra E Rotas De Beneficiamento Das Principais Mineradoras De**

Ferro De Minas Gerais. 2018. 49 f. TCC (Graduação em Engenharia de Minas) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais Unidade Araxá, Araxá, 2018

OMACHI, Geraldo Yasujiro. **Estudos para o aumento da vida útil das minas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, MG**. 2015. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

ORMOND, Maria Marta Silva. **O cenário do minério de ferro e o impacto socioeconômico do Projeto Pedra de Ferro para o estado da Bahia**. 2021. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

PASCOAL, Aline da Luz; GONÇALVES, Filipe Mattos; ANDRADE, Manuella dos Anjos; PAULO, Ana Paula Aparecida de Almeida; ALEXANDRINO, Júnia Soares. Estudo da produção de sinter feed e pellet feed de acordo com a granulometria. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, [S.L.], v. 35, n. 3, p. 151, 21 fev. 2017. SBV Sociedade Brasileira de Vacuo. <http://dx.doi.org/10.17563/rbav.v35i3.1038>.

PEREIRA, Oscar Costa; BERNARDIN, Adriano Michael. Ceramic colorant from untreated iron ore residue. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 233-234, p. 103-111, set. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.06.057>.

PESQUISA da UFMG aproveita rejeitos de mineração na construção civil. 2020. G1. Disponível em: <https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2020/01/01/pesquisa-da-ufmg-aproveita-rejeitos-de-mineracao-na-construcao-civil.ghtml>. Acesso em: 10 dez. 2023.

PESQUISA. São Paulo: FAPESP, v. 1, n. 240, fev. 2016.

REIS, Matheus de Oliveira; MOURA, Ana Carolina Mayrinck Braga de; COTA, Guilherme Eduardo Macedo; MAGALHÃES JUNIOR, Antônio Pereira. Panorama dos rompimentos de barragens de rejeito de minério no mundo. Caderno de Geografia, [S.L.], v. 30, n. 61, p. 368, 5 abr. 2020. Pontificia Universidade Católica de Minas Gerais. <http://dx.doi.org/10.5752/p.2318-2962.2020v30n61p368>.

ROCHA, Geriane Macedo. **Avaliação De Depressores Na Flotação De Rejeito De Minério De Ferro**. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

ROCHA, Luciano. **Estudo De Aproveitamento Econômico Das Lamas De Uma Mineração De Ferro, Através De Concentração Por Flotação Catiônica Reversa**. 2008. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SAMPAIO, João Alves; LUZ, Adão Benvindo da; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; GONZAGA, Ligia Mara. Separação Magnética e Eletrostática. In: LUZ, Adão Benvindo da; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida (org.). **Tratamento de Minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/McT, 2018. Cap. 8. p. 341-379.

SÃO JOSÉ, Fábio de; OLIVEIRA, Célio Guimarães; PEREIRA, Carlos Alberto. Recuperação De Ferro A Partir Do Rejeito De Espirais Da Mina De Água Limpa Por Meio De Separação Magnética. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 296-301, 2016. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.1084>.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO-AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL/FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Determina a descaracterização de todas as barragens de contenção de rejeitos e resíduos, alteadas pelo método a montante, provenientes de atividades minerárias, existentes em Minas Gerais e dá outras providências. Resolução conjunta n. 2.784, de 21 de março de 2019. **Lex: Publicação – Diário Executivo**, Minas Gerais, 22 de março de 2019, p.5.

SILVA, Ana Paula Moreira; VIANA, João Paulo; CAVALCANTE, André Luís Brasil. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Brasil). **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substância Não Energéticas**. Brasília: IPEA, 2012. 46 p.

SILVA, C. B. da; PAIVA, P. R. P. de. Artificial stone production using iron ore tailing (IOT). **Cerâmica**, [S.L.], v. 66, n. 378, p. 164-171, jun. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132020663782854>.

SILVA, Fabiane Leocádia da. **Aproveitamento e Reciclagem de Resíduos de Concentração de Minério de Ferro na Produção de Paviers e Cerâmica**. 2014. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

SILVA, Raphael Mendes Rosa da; NUNES, Rafael Mayrink; NOGUEIRA, Francielle Câmara; SILVA, Fabiane Leocádia da. Aproveitamento do rejeito de minério de ferro da Mina do Andrade para a confecção de blocos intertravados. **Tecnologia em**

Metalurgia, Materiais e Mineração, [S.L.], v. 20, p. 1-8, 2023. Editora Cubo.
<http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20222660>.

SILVA, Rodolfo Gonçalves Oliveira da. **Caracterização De Concreto Asfáltico Elaborado Com Rejeitos De Minério De Ferro Do Quadrilátero Ferrífero**. 2017. 270 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SILVEIRA, Marina Duque. **Utilização De Resíduos De Mineração Na Construção Civil**. 2015. 39 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SOUZA, Natasha Almeida Fernandes de. **Análise Crítica de Rotas de Processamento de Minérios de Ferro Itabiríticos**. 2010. 122 f. TCC (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

TOTOU, Adriano Raimundo. **Efeito da dispersão na deslamagem e flotação de polpas de minérios hematíticos itabiríticos**. 2010. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

TURRER, Henrique Dias Gatti. **Polímeros depressores na flotação de minério de ferro**. 2007. 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

U. S. Geological Survey (Estados Unidos). **Mineral Commodity Summaries, 2023**. Estados Unidos: USGS, 2023. 210 p. <https://doi.org/10.5066/P9WCYUI6>

USIMINAS. **Mineração Usiminas recebe certificado de descaracterização da Barragem Central**. 2022. Blog da Usiminas. Disponível em: <https://www.usiminas.com/blog/sustentabilidade/mineracao-usiminas-recebe-certificado-de-descaracterizacao-da-barragem-central/>. Acesso em: 15 dez. 2023.

VALE inaugura fábrica que transforma rejeitos em produtos para a construção civil. 2020. ABM. Disponível em: <https://www.abmbrasil.com.br/por/noticia/vale-inaugura-fabrica-que-transforma-rejeitos-em-produtos-para-a-construcao-civil>. Acesso em: 10 dez. 2023.

VIEIRA, Marcos Gomes. **Produção De Um Pellet Feed A Partir Da Concentração Do Rejeito Da Flotação Mecânica Da Samarco**. 2008. 90 f. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. J. **Wills' Mineral Processing Technology**: an introduction to the partial aspects of ore treatment and mineral recovery. 7. ed. Elsevier Science & Technology Books, 2006. 444 p.

WOLFF, Ana Paula. **Caracterização de Rejeitos de Minério de Ferro de Minas da VALE**. 2009. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

ZHAO, Jiangshan; NI, Kun; SU, Youpo; SHI, Yunxing. An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete properties. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 286, p. 122968, jun. 2021. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122968>.

ZHAO, Sujing; FAN, Junjiang; SUN, Wei. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 50, p. 540-548, jan. 2014. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.019>.