



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**“ESTUDO DE VIABILIDADE DE CONCENTRAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE
FERRO POR SEPARAÇÃO MAGNÉTICA”**

Júlio César Mendes Pereira

Ouro Preto

2023

Júlio César Mendes Pereira

**“ESTUDO DE VIABILIDADE DE CONCENTRAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO
DE FERRO POR SEPARAÇÃO MAGNÉTICA”**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Pereira

Co-orientadora: Dra. Francielle Câmara Nogueira

Ouro Preto

2023



FOLHA DE APROVAÇÃO

Júlio César Mendes Pereira

Estudo de viabilidade de concentração de rejeito de minério de ferro por separação magnética

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

Aprovada em 30 de novembro de 2023

Membros da banca

Doutor - Carlos Alberto Pereira - Orientador Universidade federal de Ouro Preto
Doutor - Cláudio Batista Vieira - Universidade Federal de Ouro Preto
Engenheira - Fernanda Hoffmann - GAUSTEC Tecnologia Magnética

Carlos Alberto Pereira , orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 30/12/2023



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Alberto Pereira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/12/2023, às 13:36, 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 **0646341** e o código CRC **68DA90B2**.

RESUMO

A separação magnética é um importante método de concentração, amplamente aplicado na indústria de mineração, especialmente na recuperação de ferro a partir de rejeitos depositados nas barragens. Este estudo se concentra na aplicação da separação magnética para concentrar o rejeito de minério de ferro de uma empresa localizada no Quadrilátero Ferrífero. Os experimentos foram realizados no centro de pesquisa da Gaustec, usando o equipamento Minimag® para simular um separador magnético carrossel modelo tetrapolar. Durante os experimentos, diversas variáveis foram modificadas, incluindo o campo magnético, a pressão da água de lavagem e a matriz, com o objetivo de alcançar os melhores resultados possíveis. Os resultados do estudo indicaram que o uso da água de lavagem no meio do processo de separação magnética teve um impacto significativo nos teores de ferro no concentrado e na recuperação em massa. O modelo da matriz também demonstrou ser um fator crucial. Os resultados mostraram que a matriz 3,8mm Mega BigFlux® apresentou um desempenho superior, com teores de ferro e sílica no concentrado de 66,63% e 1,65%, respectivamente. Isso foi atribuído à sua melhor seletividade magnética devido ao tamanho dos dentes da matriz. Neste teste, o rejeito também apresentou valores de teor de ferro e sílica, indicando que a possibilidade de tratar o rejeito rougher para produzir outro concentrado a ser misturado (blend) com o concentrado rougher pode ser uma estratégia promissora. Por fim, esse trabalho destacou a importância da seleção criteriosa das variáveis no processo de separação magnética para atingir os melhores resultados econômicos e de qualidade.

Palavras-chave: Separação magnética, rejeito de minério de ferro, matrizes magnéticas.

ABSTRACT

Magnetic separation is an important concentration method widely applied in the mining industry, particularly in the recovery of iron from tailings deposited in dams. This study focuses on the application of magnetic separation to concentrate iron ore tailings from a company located in the Cuadrilátero Ferrífero region. Experiments were conducted at the Gaustec research center using the Minimag® equipment to simulate a tetrapolar carousel magnetic separator. During the experiments, various variables were adjusted, including the magnetic field, wash water pressure, and matrix, with the aim of achieving the best possible results. The study's results indicated that the use of wash water during the magnetic separation process had a significant impact on the iron content in the concentrate and mass recovery. The matrix model also proved to be a crucial factor. The results showed that the 3.8mm Mega BigFlux matrix exhibited superior performance, with iron and silica content in the concentrate of 66.63% and 1.65%, respectively. This was attributed to its enhanced magnetic selectivity due to the size of the matrix teeth. In this test, the tailings also displayed iron and silica content, suggesting that the possibility of treating the rougher tailings to produce another concentrate for subsequent blending with the rougher concentrate could be a promising strategy. Finally, this study underscored the importance of carefully selecting variables in the magnetic separation process to achieve the best economic and quality outcomes.

Keywords: Magnetic separation, iron ore tailings, magnetic matrices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Orientação dos polos magnéticos	11
Figura 2- Configuração do dipolo atômico para um material diamagnético na ausência e na presença de um campo magnético.....	12
Figura 3- materiais paramagnéticos	13
Figura 4- materiais ferromagnéticos	13
Figura 5-separador magnético de tambor de alta intensidade	15
Figura 6-Separador magnético Steinert de correia cruzada.....	15
Figura 7-Separador magnético carrossel GX 3600	16
Figura 8-Dimensões básicas das matrizes magnéticas	18
Figura 9-Placa Ranhurada Comum 8R (3.175 mm) e os Novos Dentes Padronizados.....	19
Figura 10-Áreas Relativas	19
Figura 11- Concentrador magnético Minimag® Gaustec.....	21
Figura 12- Linha neutra bipolar (2 pontos de alimentação/rotor)	22
Figura 13- Linha neutra tetrapolar (4 pontos de alimentação/rotor)	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis referentes aos testes *rougher* de 1 a 7.....23

Tabela 2 - Variáveis referentes aos testes *rougher* de 8 a 14.....24

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	OBJETIVOS	8
2.1	Objetivo Geral	8
2.2	Objetivos Específicos	8
3	REVISÃO DA LITERATURA	9
3.1	Rejeito de minério de ferro	9
3.2	Fundamentos da separação magnética	10
3.5	Matrizes magnéticas	18
3.6	Separadores magnéticos da Gaustec	19
4	MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1	MATERIAIS	22
4.2	ENSAIOS DE CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA ROUGHER	22

1 INTRODUÇÃO

O minério de ferro desempenha um papel fundamental na indústria metalúrgica, sendo a principal matéria-prima utilizada no desenvolvimento de vários produtos. Através de processos de beneficiamento, o minério é tratado para a obtenção do concentrado, que é a parte comercializável do material. No entanto, durante esse processo, também são gerados rejeitos como subprodutos (Araújo, 2006). Embora esses rejeitos não sejam o principal alvo do beneficiamento, contêm quantidades consideráveis de ferro.

Historicamente, os rejeitos de minério de ferro eram dispostos em barragens, mas após os trágicos eventos de Mariana – MG (2015) e Brumadinho – MG (2019), a utilização dessas estruturas tem sido restringida (Silva *et al.*, 2023). Em virtude dos avanços da legislação ambiental, as mineradoras têm buscado melhorar a gestão de seus resíduos, através de formas que permitam o aproveitamento dos rejeitos gerados em seus processos (Costa, 2014; Apaza *et al.*, 2018; Portes, 2013)

A viabilidade de reutilização dos resíduos já dispostos em barragens está diretamente relacionada às suas características físicas e químicas, tornando essencial a determinação de suas propriedades (Andrade, 2014). Estudos recentes, indicam que os rejeitos de minério de ferro podem ser utilizados em diversas aplicações, como estabilização do solo, fabricação de blocos de concreto intertravados e composições asfálticas (Oliveira, 2021). Além disso, outras pesquisas destacam o uso para fabricação de argamassa, na indústria da cerâmica e como materiais para o setor de pavimentação (Silva *et al.*, 2023)

Outra estratégia promissora para aproveitar os rejeitos é o aprimoramento das atuais técnicas de concentração, visando a recuperação máxima dos minerais de ferro nesses materiais, transformando-os em subprodutos comercializáveis (Ferrante, 2014). Neste contexto, a concentração magnética surge como uma alternativa viável para beneficiar o rejeito do processamento do minério de ferro.

Empresas como a Gaustec Tecnologia Magnética tem se destacado nesse campo, com estudos relacionados à otimização do processo de separação magnética. A configuração atual dos equipamentos possibilita o processamento de grandes volumes de material, obtendo produtos

com alto teor de ferro e baixo teor de impurezas (Rocha, 2018). Além disso, o desenvolvimento de matrizes com design próprio, capacitadas para elevar o gradiente e campo magnético, tem mostrado resultados positivos, evitando entupimento por granulometria, permitindo uma alimentação por partículas maiores que o GAP da matriz (Rodrigues, 2022).

Diante desse contexto, desenvolveu-se o presente trabalho que teve como objetivo realizar um estudo sobre a aplicação da separação magnética de alta intensidade (WHIMS) utilizando a tecnologia BigFLUX® da NewGAPS para o tratamento do rejeito de minério de ferro com granulometria inferior a 150 μm , proveniente de uma mina do Quadrilátero Ferrífero.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo geral realizar um estudo sobre a aplicação da separação magnética de alta intensidade (WHIMS) utilizando a tecnologia BigFLUX® da Gaustec Magnetic Technology para o tratamento do rejeito de minério de ferro com granulometria inferior a 150 µm.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Levantar a problemática do aproveitamento de rejeito;
- b) Avaliar no separador em escala piloto do tipo Jones (MiniMag®), com as matrizes de GAP 0.5 mm Super, Mega e Giga BigFLUX®; 1,1 mm Super, Mega e Giga BigFLUX® e 3,8 mm Mega BigFLUX® realizando etapas rougher a possibilidade de alcançar um concentrado.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão da literatura relacionada aos temas relevantes a esta monografia.

3.1 Rejeito de minério de ferro

Na última década, houve um aumento na preocupação em relação aos resíduos sólidos gerados durante o processo de beneficiamento do minério de ferro, principalmente após os problemas de rompimento de barragem. De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), no Brasil, foram geradas dezenas de milhões de toneladas de rejeito de minério de ferro (RMF). Especificamente em Minas Gerais, a quantidade de resíduos sólidos gerados pela mineração no ano de 2015 atingiu a marca de 606 milhões de toneladas (Bezerra, 2017). O aumento gradual na geração de resíduos sólidos ao longo dos anos tem levado a uma correspondente necessidade de espaço para sua disposição, gerando desafios tanto no âmbito econômico quanto ambiental, quanto econômico, como discutido por Ferreira *et al.*, (2016) e mencionado por Bezerra (2017).

Os resíduos gerados pela mineração podem ser categorizados em duas principais classes: estéreis e rejeitos. No contexto da mineração, o termo “material estéril” abrange diferentes tipos de rochas, solo, argilas, areia, cascalho que são removidos durante o processo exploração mineral, mas que não possuem valor econômico intrínseco ou utilidade para a operação em andamento. A remoção do material estéril é necessária para acessar o minério desejado, muitas vezes envolvendo escavação para alcançar as camadas onde o minério está presente. A gestão adequada desse material é importante para minimizar os impactos ambientais, garantir a segurança nas operações e otimizar a eficiência do processo da mineração.

Na China, estima-se que sejam produzidas aproximadamente 1,5 toneladas de rejeito de minério de ferro (RMF) para cada tonelada de minério concentrado, conforme apontado por Wang, Li e Xin (2000) citado por Bezerra (2017). Anualmente, a produção de RMF chega a 180 milhões de toneladas, com aumento anual que chega até 8% (Zhang, Xue e Jin, 2004).

Na Índia, é observada uma perda de até 12 milhões de toneladas de rejeito de minério de ferro (RMF) com um diâmetro de 150 μm . Essa quantidade de material possui potencial para ser

aproveitada, como indicado por Bakulamba Devi *et al.*, (2015). Estima-se que a geração de RMF na Índia corresponda a aproximadamente 10% a 25% do peso do minério de ferro extraído, e isso conduz a conclusão que cerca de 18 milhões de toneladas de rejeito são dispostas em bacia de rejeito anualmente (Das, Kumar e Ramachandrarao (2000) citado por Bezerra (2017)).

Na Austrália Ocidental é gerado por ano aproximadamente 632 milhões de toneladas de rejeito, esta quantidade gerada pode ocasionar graves problemas relacionados a saúde pública e meio ambiente (Santos et al. 2012) citado por (Bezerra, 2017).

No Brasil, o método de disposição de rejeito mais utilizado é por meio de barragens, as quais necessitam de planejamento e monitoramento contínuo para prevenção de acidentes (Brasil, 2012). Em Minas Gerais, já é possível encontrar grande dificuldade no licenciamento de barragens em áreas maiores que 800 hectares, ainda é possível observar grande repressão por meio de opiniões públicas além de preocupação com questões ambientais, levando o estudo de outras formas de disposição de rejeito (Guimarães, Valadão e Peres, 2012).

Nos dias atuais milhões de toneladas de rejeito são gerados e depositados em barragens, ao decorrer dos tempos vem aumentando o número de incidentes relacionados a rompimento de barragem, resultado de condições meteorológicas extremas ou desastres naturais (Wise Uranium Projecto, 2017) citado por (Bezerra, 2017).

Só no estado de Minas Gerais, estavam cadastradas 737 barragens no ano de 2016, destas 5% apresentavam algum risco na estrutura e precisavam de intervenções (FEAM, 2016).

Com o passar dos anos presenciamos alguns desastres envolvendo barragens de rejeito, no ano de 2010 em Ajka, na Hungria, houve um vazamento de resíduos de bauxita, levando a inúmeras fatalidades, além de problema ambientais (Ruyters et al., 2011). Em 2000, houve um rompimento de barragem em Baia Mare, na Romênia, causado por desastres naturais, levando ao vazamento de cerca de 100.000 m³ resíduos contaminados com cianeto, ocasionando morte de toneladas de peixe e deixando milhões de pessoas sem água potável, por conta da contaminação do rio (Wise Uranium Projecto, 2017).

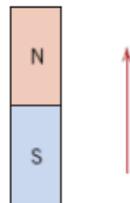
3.2 Fundamentos da separação magnética

O magnetismo pode ser entendido como um fenômeno, no qual certos materiais exercem uma força de repulsão ou atração sobre outros. É sabido ainda que todas substâncias são influenciadas pelo campo magnético, seja com maior ou menor intensidade (Callister e Retwisch, 2016).

De acordo com Callister e Retwisch (2016) um dipolo magnético é uma configuração que consiste em dois polos magnéticos, de igual magnitude, mas de cargas opostas dispostos próximos um ao outro. Esses polos magnéticos são conhecidos como polo norte (N) e sul (S), semelhantes aos polos de um ímã comum. A formação de um dipolo magnético pode ser resultado de uma corrente elétrica circulando em uma espiral ou da orientação dos elétrons em um átomo.

O momento magnético de um dipolo é definido como o produto do polo magnético pela distância entre os dois polos. Esse momento pode ser representado por um vetor que aponta do polo negativo ao polo positivo (Figura 1), e sua magnitude é obtida multiplicando a magnitude de cada polo pela distância que os separa. O campo magnético gerado por um dipolo é mais intenso próximo aos polos e enfraquece rapidamente à medida que nos afastamos dele (Callister e Retwisch, 2016).

Figura 1: Orientação dos polos magnéticos



Fonte - Callister e Retwisch 2016

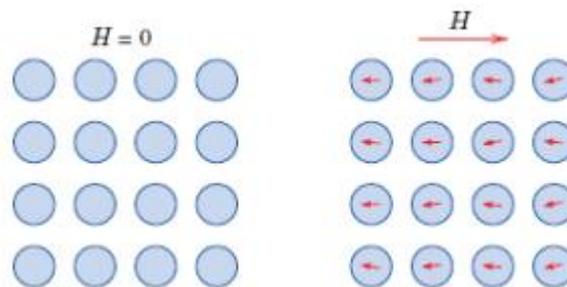
A suscetibilidade magnética é uma propriedade física que mede a facilidade com que um material pode ser magnetizado em resposta a um campo magnético externo. Ela é definida como a razão entre a magnetização (m) do material e a intensidade do campo magnético externo (H) que o produz. (Callister e Retwisch 2016)

$$y = \frac{m}{H} \quad (1)$$

A suscetibilidade magnética é uma propriedade intrínseca dos materiais e depende de várias características, tais como sua composição, estrutura cristalina, tamanho de grão, temperatura, entre outras variáveis. Os materiais podem apresentar três tipos distintos de comportamento magnético: diamagnético, paramagnético e ferromagnético (Callister e Retwisch 2016).

Os materiais diamagnéticos são aqueles que possuem suscetibilidade magnética negativa, o que significa que são repelidos pelo campo magnético externo. Exemplos de materiais diamagnéticos incluem cobre, prata e ouro. Na Figura 2, é possível visualizar a configuração do dipolo atômico para um material diamagnético na ausência e na presença de um campo magnético externo. Quando não há um campo externo ($H=0$), não há dipolos presentes. No entanto, quando um campo magnético é aplicado (H), os dipolos são induzidos a se alinharem em uma direção oposta ao campo magnético externo (Callister e Retwisch 2016).

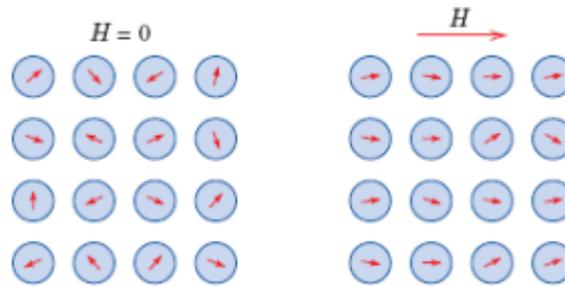
Figura 2- Configuração do dipolo atômico para um material diamagnético na ausência e na presença de um campo magnético



Fonte – modificada de Callister e Retwisch 2016

Materiais paramagnéticos possuem suscetibilidade magnética positiva, o que significa que são atraídos pelo campo magnético externo e se alinham na mesma direção do campo magnético aplicado, conforme demonstrado na Figura 3. Exemplos de materiais paramagnéticos incluem alumínio, platina e (Callister e Retwisch, 2016).

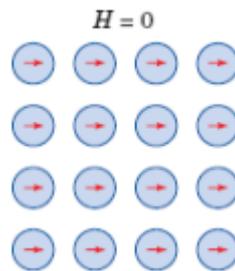
Figura 3- materiais paramagnéticos



Fonte - modificada de Callister e Retwisch 2016

Materiais ferromagnéticos possuem uma suscetibilidade magnética muito alta. São altamente magnetizados na presença de um campo externo e podem manter uma magnetização mesmo após a remoção do campo magnético externo (Figura 4). Exemplos de materiais ferromagnéticos incluem ferro, níquel e cobalto (Callister e Retwisch 2016).

Figura 4- materiais ferromagnéticos



Fonte - modificado por Callister e Retwisch 2016

O antiferromagnetismo é um fenômeno magnético que ocorre em certos materiais. Em materiais antiferromagnéticos, os spins magnéticos dos átomos individuais se alinham em direções opostas dentro de uma estrutura cristalina. Isso resulta em um cancelamento global do magnetismo líquido. Embora cada átomo tenha seu momento magnético, esses momentos são orientados a se anularem mutuamente. Como resultado, os materiais antiferromagnéticos não exibem comportamento magnético aparente na ausência de um campo magnético externo (Callister e Retwisch 2016)

O ferrimagnetismo é um tipo de magnetismo, no qual os momentos magnéticos dos átomos ou íons em um material não se cancelam completamente, mas estão alinhados em direções opostas de forma não totalmente compensatória. Isso significa que existe um momento

líquiagnetismo, em que os momentos magnéticos estão alinhados na mesma direção, no ferrimagnetismo os momentos magnéticos estão alinhados nas direções opostas, mas não se cancelam completamente (Callister e Retwisch, 2016).

3.3 Separação magnética como método de concentração

A separação magnética é um processo de separação de misturas que se baseia nas propriedades magnéticas dos materiais. Esse método explora a diferença na suscetibilidade magnética dos materiais, ou seja, a capacidade de um material para ser magnetizado quando exposto a um campo magnético (Silva, 2020).

Existem dois tipos principais de separação magnética: a separação magnética de alta intensidade e a separação magnética de baixa intensidade. Na separação magnética de alta intensidade, um campo magnético é aplicado a uma mistura para separar materiais magnéticos dos não magnéticos. Na separação magnética de baixa intensidade, um campo magnético mais fraco é aplicado e os materiais magnéticos são separados com base em sua suscetibilidade magnética. Os materiais magnéticos são atraídos para uma região de maior intensidade de campo magnético, enquanto os materiais não magnéticos permanecem na região de menor intensidade de campo (Silva, 2020).

Existem vários tipos de separadores magnéticos que podem ser usados em diferentes processos de separação de materiais magnéticos. Alguns dos principais tipos de separadores magnéticos são:

- a) Separador magnético de tambor (Figura 5): composto por um tambor giratório que contém ímãs permanentes em seu interior. Quando os materiais são alimentados no tambor, os metais ferrosos são atraídos para a superfície do tambor pela força magnética e ficam aderidos a ele. Ao mesmo tempo, os materiais não ferrosos continuam a passar pelo tambor e são descarregados no final da correia transportadora. Esse tipo de separador pode ser projetado para lidar com diferentes tamanhos de partículas e capacidades de produção, além de permitir a configuração de diferentes graus de intensidade magnética para se adaptar a diferentes materiais e requisitos de separação (SAMPAIO, et al., 2018).

Figura 5-separador magnético de tambor de alta intensidade



Fonte- IBRAS, 2023.

- b) Separador magnético de correia (Figura 6): composto por uma correia transportadora que passa sobre um tambor magnético. Esse tambor é um cilindro oco revestido com ímãs permanentes ou eletroímãs, o que gera um campo magnético forte. À medida que a correia transportadora se move, os materiais alimentados sobre ela são levados para o tambor magnético (Sampaio et al., 2018). Os materiais ferromagnéticos, como partículas de minério contendo ferro, são atraídos pelo campo magnético e aderem à superfície da correia, enquanto os materiais não magnéticos continuam a se mover ao longo da correia e são descarregados em outra área. A medida que a correia se afasta do tambor magnético, os materiais ferromagnéticos são liberados e coletados em uma área separada (Silva, 2020).

Figura 6-Separador magnético Steinert de correia cruzada



Fonte: Svoboda, 2003.

- c) Separador magnético de carrossel (Figura 7): é um equipamento utilizado na indústria de mineração para separação magnética de minerais ferrosos de minerais não ferrosos. Esse tipo de separador composto por várias bobinas magnéticas fixas no carrossel, que giram em torno de um eixo central. O processo começa com a alimentação sendo orientada no centro do carrossel e passando pelas bobinas que estão seguídas em uma posição fixa em relação ao eixo. Conforme a alimentação passa pelas bobinas, os minerais ferrosos são atraídos pela força magnética e são separados dos minerais não ferrosos, que continuam seguindo pelas bobinas e são descarregados em uma saída separada (Silva, 2020).

Figura 7-Separador magnético carrossel GX 3600



Fonte: Ribeiro, 2010.

Algumas das variáveis que podem influenciar o desempenho do separador magnético de carrossel incluem:

- a) Intensidade magnética: a intensidade do campo magnético gerada pelas bobinas é uma variável importante que pode afetar a eficácia da separação. É importante ajustar a intensidade magnética para cada tipo de mineral que está sendo separado, bem como para as condições específicas do processo de separação (Silva, 2020).
- b) Tamanho do carrossel: o número de bobinas e polos e a posição do carrossel em relação ao eixo central são importantes. O tamanho do carrossel pode ser ajustado para acomodar diferentes taxas de alimentação e tamanhos de partículas (Silva, 2020).
- c) Velocidade do carrossel: a velocidade de rotação é uma variável importante que pode afetar a eficiência da separação. Uma velocidade muito alta pode reduzir a eficácia da separação, enquanto uma velocidade muito baixa pode aumentar o tempo de residência das partículas nos tambores magnéticos, o que pode levar a uma redução na eficiência da separação, além de influenciar no arraste das partículas (Silva, 2020).
- d) Tipo de minerais: A concentração e distribuição de minerais na alimentação também pode influenciar a eficácia da separação, pois alguns minerais são mais facilmente separados por forças magnéticas do que outros. (Silva, 2020).
- e) Umidade: a presença de água na alimentação pode afetar a eficiência da separação magnética, pois a água pode reduzir a força do campo magnético. Portanto, a porcentagem de sólidos da alimentação deve ser monitorado e controlado para otimizar o desempenho do separador magnético de carrossel (Silva, 2020).

3.4 Gaustec Tecnologia Magnética

A empresa Gaustec é uma empresa brasileira especializada em tecnologias de separação magnética de alta intensidade. Fundada em 2002, a empresa tem sede em Belo Horizonte, Minas Gerais, e atua em diversas áreas, como mineração, siderurgia, reciclagem, meio ambiente e biotecnologia (Rodrigues, 2022).

A Gaustec é mundialmente conhecida pela qualidade de seus equipamentos de separação magnética, como os separadores magnéticos de alta intensidade, os carrosséis magnéticos e os sistemas de separação magnética em fluxo contínuo. Esses equipamentos são capazes de separar partículas magnéticas em diferentes tamanhos e características, garantindo uma alta eficiência de separação e uma grande capacidade de produção (Rodrigues, 2022).

Além dos equipamentos de separação magnética, a Gaustec oferece também serviços de consultoria e assistência técnica, realizando estudos de viabilidade, projetos de engenharia e análises de desempenho dos equipamentos de separação magnética (Rodrigues, 2022).

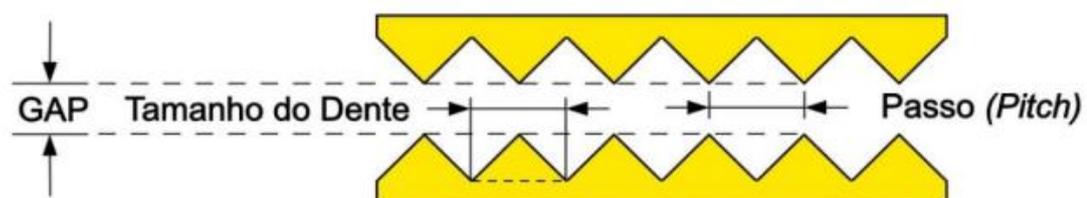
3.5 Matrizes magnéticas

As matrizes magnéticas são importantes componentes de um separador magnético, pois são responsáveis por aumentar o gradiente e, conseqüentemente, produzir campos magnéticos de alta intensidade (Silva, 2020).

As primeiras matrizes dentadas criadas para separador carrossel do tipo Jones, a matriz 8R, denominada matriz comum, é composta por oito dentes por polegadas, com uma distância entre cada dente (*pitch*) de 3,175 mm. Posteriormente, outras matrizes foram desenvolvidas para atender minérios de granulometria distintas, como a matriz 4R que possui quatro dentes por polegada e distância entre os dentes de 6,35 mm, e a matriz 12R, com doze dentes por polegada e distância entre os dentes de 2,2 mm, respectivamente (Rodrigues, 2022).

No entanto, com o aumento da demanda por beneficiamento de minérios, tornou-se necessário desenvolver tecnologia para tratar minérios finos, ultrafinos ou com baixa qualidade. A separação magnética de minérios com granulometria fina requer uma matriz com espaçamento entre os dentes (*GAP*) menor. No entanto, as matrizes comuns apresentam grandes problemas em trabalhar com esse formato, pois, ao diminuir o *GAP*, aumenta a probabilidade de entupimento devido à redução da área livre, o que dificulta a passagem da polpa. Constatou-se que matrizes comuns com *GAP* menor que 1,5 mm são totalmente inviáveis (Rodrigues, 2022). As diferenças entre *GAP* e *Pitch* podem ser evidenciadas na Figura 8.

Figura 8-Dimensões básicas das matrizes magnéticas



Fonte: Gaustec, 2021.

Diante dessa necessidade, em 2021, a Gaustec em parceria com a *NewGAPS* desenvolveu as matrizes *BigFLUX*® (Figura 9 e Figura 10), que apresenta o mesmo *GAP* da matriz comum, mas com o *pitch* maior, gerando uma maior área e, conseqüentemente, permitindo alcançar um campo magnético mais intenso (Rodrigues, 2022).

Figura 9-Placa Ranhurada Comum 8R (3.175 mm) e os Novos Dentes Padronizados

PLACA COMUM	TAMANHO DE DENTES PADRONIZADOS E NOME COMERCIAL			
				
DENTE COMUM	Standard BigFLUX	SUPER BigFLUX	MEGA BigLUX	GIGA BigFLUX
3,175 mm	4,5 mm	5,5 mm	7,0 mm	8,5 mm

Fonte: Gaustec, 2021.

Figura 10-Diferença de área da matriz comum comparada as matrizes BigFLUX®(para gap=0) .

Pitch (tamanho do dente)				
8R 3.175	4.5	5.5	7.0	8.5
				
Area Ref.	2 x	3 x	5 x	7 x

FMA - Fator Multiplicador da Área

Fonte: Gaustec, 2021

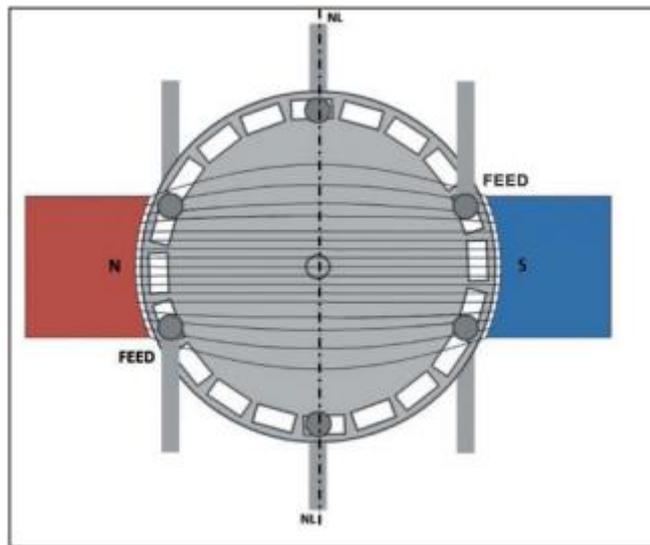
3.6 Separadores magnéticos da Gaustec

A Gaustec é uma empresa responsável por fabricar vários separadores magnéticos, abrangendo desde o menor equipamento utilizado em escala de teste laboratorial e escala piloto até o maior separador magnético carrossel do mundo, conhecido como GHX-1400. Quando em conjunto com a matriz 5,0mm comum e a vazão nominal, esse equipamento pode chegar a produção de 1400 toneladas por hora (Gaustec, 2021).

Na escala piloto, a Gaustec desenvolveu o Minimag, um separador magnético com capacidade de alimentação de 500kg/h, composto por 2 polos magnéticos. Esse separador permite a simulação de um equipamento tetrapolar e bipolar, ajustando a mangueira de alimentação (Gaustec, 2021).

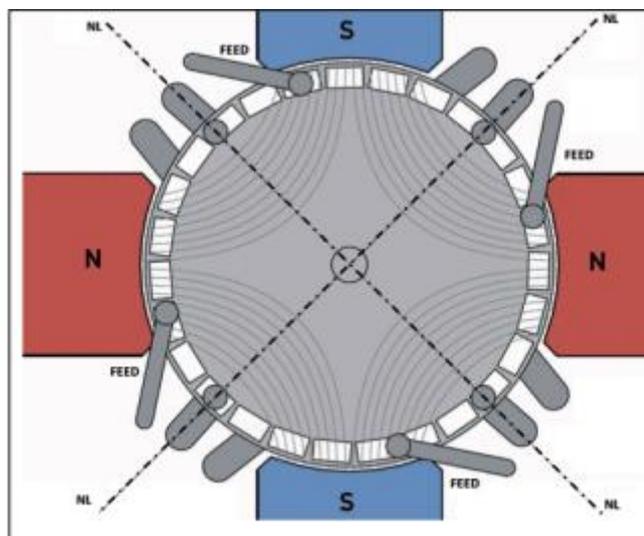
Industrialmente, os separadores magnéticos carrossel são compostos por 2 rotores posicionados em um único eixo. A Gaustec produz separadores magnéticos de 2 rotores tetrapolares (Figura 12) e hexapolares.. Segundo Rodrigues (2022), os separadores magnéticos tetrapolares e hexapolares podem ser diferenciados pela disposição das bobinas e dos polos magnéticos. Essa disposição permite uma taxa de alimentação maior em comparação com o modelo bipolar (Figura11). O modelo tetrapolar possui 4 pontos de alimentação no rotor superior e 4 pontos no rotor inferior, enquanto o modelo hexapolar tem 6 pontos de alimentação em ambos os rotores.

Figura 11- Linha neutra bipolar (2 pontos de alimentação/rotor)



Fonte: Ribeiro e Riberio,2010.

Figura 12 - Linha neutra tetrapolar (4 pontos de alimentação/rotor)



Fonte: Ribeiro e Ribeiro, 2010.

Os separadores do tipo carrossel são alimentados por polpa diretamente na caixa de distribuição, que alimenta as matrizes. O campo magnético gerado dentro das matrizes captura as partículas magnéticas, enquanto as partículas não magnéticas caem na caixa de rejeito por ação da gravidade. Para diminuir a contaminação no concentrado, é realizada uma lavagem no médio com intuito de remover as partículas não magnéticas que eventualmente foram arrastadas. Por fim, na zona de campo neutro, as partículas magnéticas são depositadas por meio de lavagem por água de alta pressão (Rodrigues, 2022).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios desta pesquisa foram realizados no Centro de Pesquisa Gaustec Magnetic localizada em Nova Lima -MG.

4.1 MATERIAIS

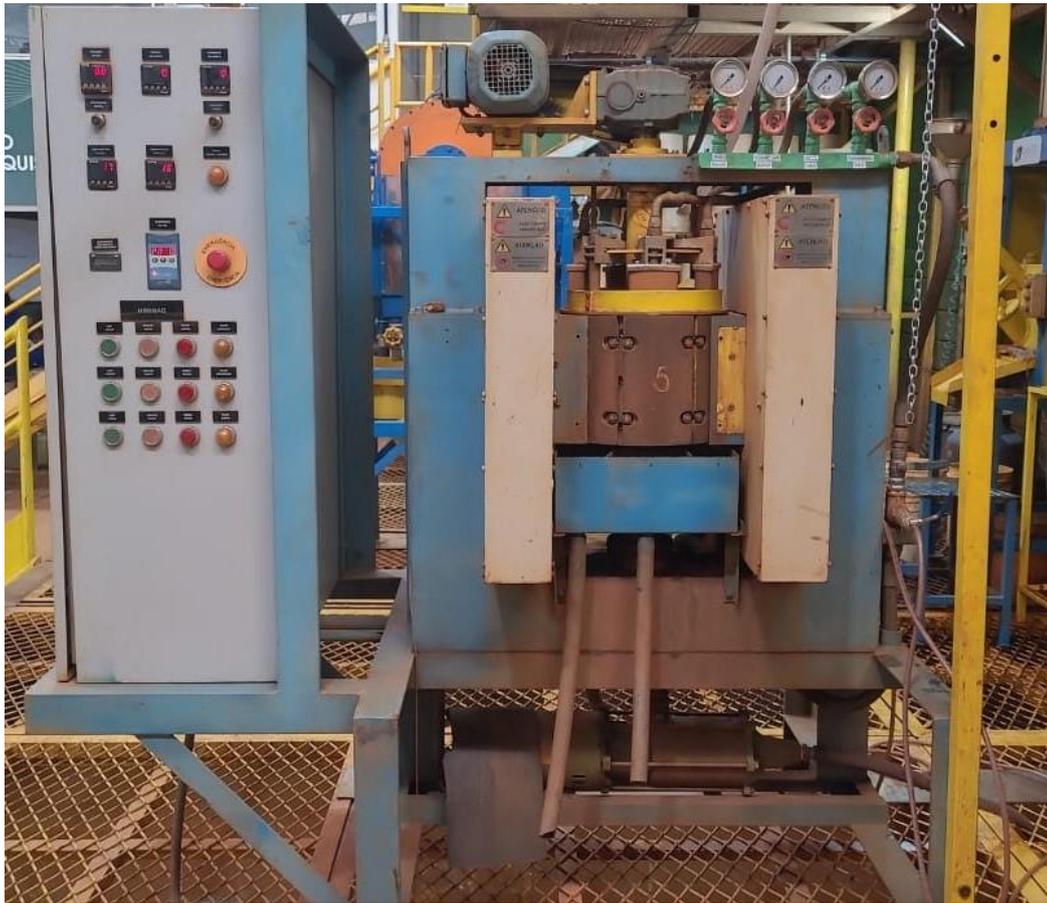
A amostra de rejeito de minério de ferro foi obtida em uma mina localizada no Quadrilátero Ferrífero. O material foi homogeneizado em polpa e logo após peneirado em 0,15 mm, utilizando uma peneira quadrada (50x50x10cm). O *undersize* foi utilizado para a preparação da polpa.

Após o peneiramento a úmido, parte do material foi colocado em um tanque agitador com capacidade de 100L. Para ajustar a densidade foi utilizado uma proveta de 1L e uma balança, conforme necessário era adicionado água ou material até chegar no percentual de sólidos necessário.

O tanque contemplava uma bomba de polpa e um medidor de vazão acoplado na tubulação de 1/2", onde com auxílio de um painel eletrônico era possível manter a vazão conforme a necessidade dos ensaios. Desta maneira, a polpa era bombeada para uma caixa de alimentação logo após, alimentava o separador magnético.

4.2 ENSAIOS DE CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA ROUGHER

Os testes de separação magnética foram realizados no Minimag® apresentado na Figura 13.

Figura 13- Separador magnético *Minimag*®.

Fonte: Autoria própria

A primeira bateria de testes, denominada etapa *rougher*, foi realizada com uma amostra contendo 51,54% Fe e 10,51% SiO₂, variando o *gap* e o modelo da matriz, campo magnético, e pressão da água de lavagem do médio. Nos testes *rougher* de 1 a 7 a pressão de água de médio foi fechada e nos testes *rougher* de 8 a 14 foi utilizada pressão de 4 kgf/cm² de água de médio. Outras variáveis como pressão da água de lavagem do concentrado, densidade de polpa, vazão e rpm (rotação por minuto) permaneceram constante, conforme pode ser observado nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Variáveis referentes aos testes *rougher* de 1 a 7

Variáveis	<i>Rougher</i> 1	<i>Rougher</i> 2	<i>Rougher</i> 3	<i>Rougher</i> 4	<i>Rougher</i> 5	<i>Rougher</i> 6	<i>Rougher</i> 7
GAP (mm)	0,5 mm Super BigFLUX	0,5 mm Mega BigFLUX	0,5 mm Giga BigFLUX	1,1 mm Super BigFLUX	1,1 mm Mega BigFLUX	1,1 mm Giga BigFLUX	3,8 mm Mega BigFLUX
Campo magnético (Gauss)	20000	22000	22000	18000	18000	18000	13000
Corrente (A)	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	23,0
Pressão de água concentrado (kgf/cm ²)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Pressão de água médio (kgf/cm ²)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SG (t/m ³)	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18
Densidade de Polpa (t/m ³)	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
% Sólidos	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05
RPM	5	5	5	5	5	5	5
Vazão (m ³ /h)	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 - Variáveis referentes aos testes *rougher* de 8 a 14

Variáveis	<i>Rougher</i> 8	<i>Rougher</i> 9	<i>Rougher</i> 10	<i>Rougher</i> 11	<i>Rougher</i> 12	<i>Rougher</i> 13	<i>Rougher</i> 14
GAP (mm)	0,5 mm Super BigFLUX	0,5 mm Mega BigFLUX	0,5 mm Giga BigFLUX	1,1 mm Super BigFLUX	1,1 mm Mega BigFLUX	1,1 mm Giga BigFLUX	3,8 mm Mega BigFLUX
Campo magnético (Gauss)	20000	22000	22000	18000	18000	18000	13000
Corrente (A)	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	23,0
Pressão de água concentrado (kgf/cm ²)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Pressão de água médio (kgf/cm ²)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
SG (t/m ³)	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18
Densidade de Polpa (t/m ³)	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
% Sólidos	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05
RPM	5	5	5	5	5	5	5
Vazão (m ³ /h)	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600

Fonte: Autoria própria.

5 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados a análise e discussões dos resultados obtidos na pesquisa.

5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA ROUGHER

Os resultados dos testes descritos na Tabelas 3 e Tabela 4 mostram a influência das variáveis analisados nos testes. Os testes *rougher* de 1 a 7 foram realizados com modelos de matrizes diferentes, com 4kgf/cm² de pressão de água no concentrado e com a pressão de água de médio fechada.

Nos testes de *rougher* de 8 até 14, os mesmos modelos de matrizes utilizadas nos testes *rougher* de 1 até 14 foram repetidos, mas com o uso de 4kgf/cm² de pressão de água no concentrado e 4kgf/cm² de pressão de água no médio. Com isso, observou-se que a utilização de água de médio levou a um aumento no teor de ferro no concentrado, mas em contrapartida houve diminuição da recuperação mássica.

Tabela 3 – Resultados referentes aos testes *rougher* de 1 a 7

Variáveis	Rougher 1	Rougher 2	Rougher 3	Rougher 4	Rougher 5	Rougher 6	Rougher 7
Massa seca magnética(kg):	0,372	0,394	0,395	0,586	0,487	0,390	0,397
Massa seca de não magnética(kg):	0,366	0,414	0,434	0,510	0,520	0,410	0,522
Recuperação Mássica sem o médio pela massa (%):	50,41	48,76	47,65	53,47	48,36	48,75	42,89
Recuperação Mássica pela química (%):	55,96	52,39	49,21	56,67	52,84	52,64	44,88
Recuperação Metalúrgica (%):	69,28	65,05	61,20	70,20	65,25	64,93	55,98
Concentrado (%Fe)	63,81	63,99	64,1	63,84	63,64	63,58	64,29
Concentrado (%SiO₂)	2,7	2,78	2,87	2,56	2,75	2,61	3,01
Rejeito (%Fe)	35,95	37,84	39,37	35,45	37,98	38,16	41,16
Rejeito (%SiO₂)	20,97	19,54	18,35	21,03	19,55	19,22	16,49

Fonte: Autoria própria.

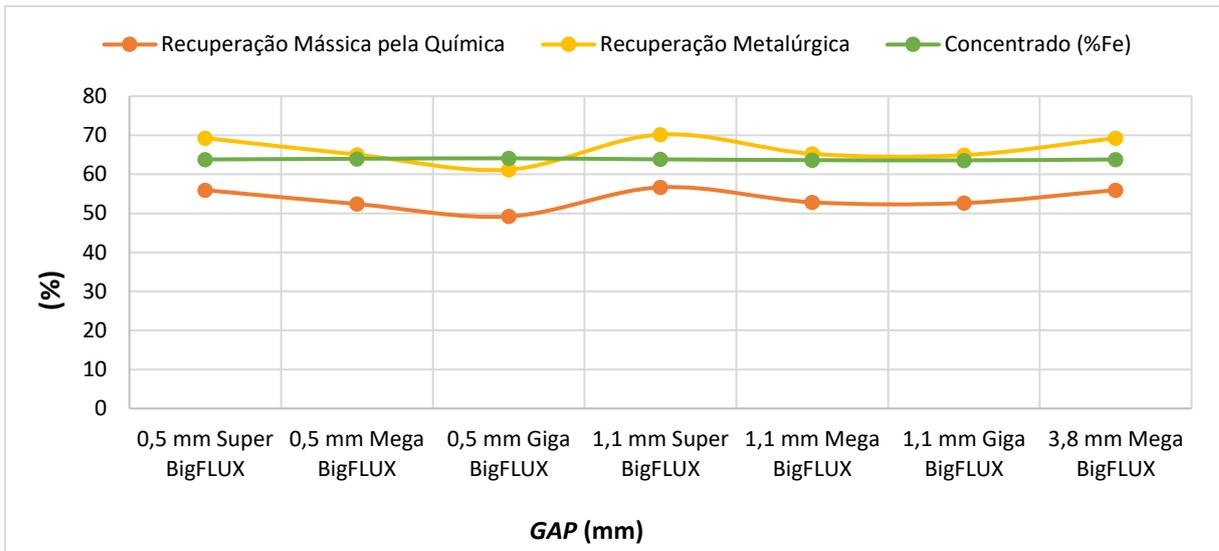
Tabela 4 – Variáveis referentes aos testes *rougher* de 8 a 14

Variáveis	Rougher 8	Rougher 9	Rougher 10	Rougher 11	Rougher 12	Rougher 13	Rougher 14
Massa seca magnética(kg):	0,360	0,356	0,334	0,420	0,356	0,300	0,328
Massa seca de não magnética(kg):	0,438	0,498	0,508	0,481	0,512	0,426	0,625
Recuperação Mássica sem o médio pela massa (%)	45,11	41,69	39,67	46,61	41,01	41,32	34,42
Recuperação Mássica pela química (%)	50,69	45,01	42,30	51,65	44,72	43,79	35,49
Recuperação Metalúrgica (%)	64,12	57,49	53,55	65,33	57,13	55,86	45,87
Concentrado (%Fe)	65,2	65,82	65,25	65,19	65,84	65,75	66,63
Concentrado (%SiO₂)	1,98	1,89	1,85	1,87	1,8	1,86	1,65
Rejeito (%Fe)	37,5	39,85	41,49	36,96	39,97	40,47	43,24
Rejeito (%SiO₂)	19,41	17,68	17,1	20,03	17,8	17,55	15,59

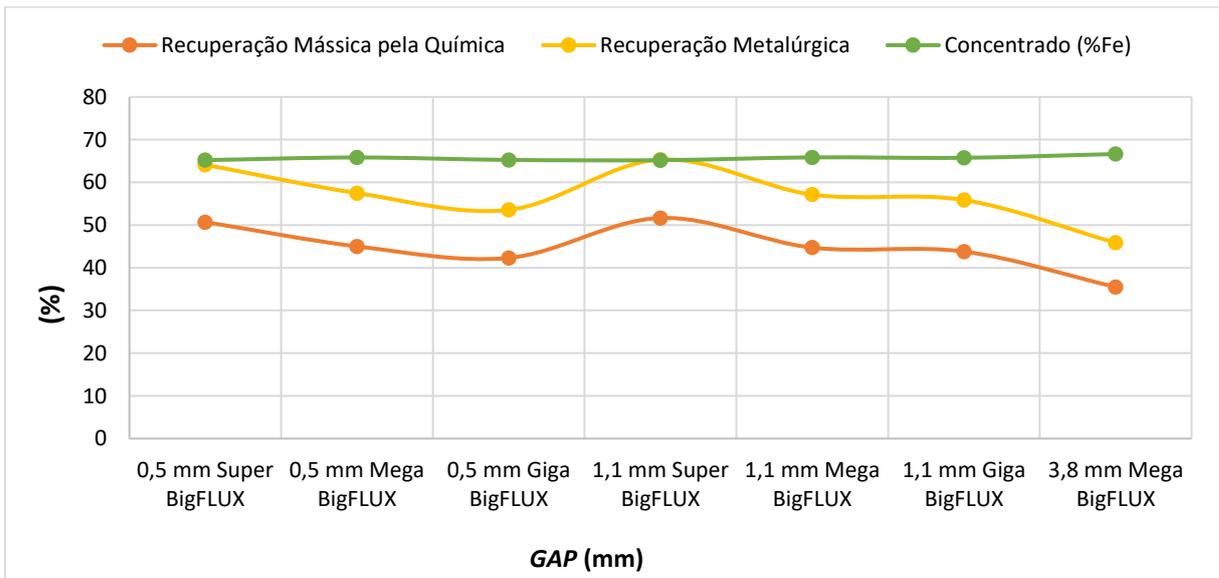
Fonte: Autoria própria.

Em relação aos testes com água de lavagem modelos das matrizes, os maiores teores de ferro no concentrado foram obtidos com as matrizes 3,8mm Mega BigFlux e os maiores resultados para recuperação mássica foram com as matrizes 1,1mm Super BigFlux.

Conforme descrito no Gráfico 1, os resultados da separação magnética obtidos nos testes realizados sem água de lavagem de médio, pode-se identificar que o teor de ferro foi inferior aos testes descritos no Gráfico 2, onde foi utilizado 4 kgf/cm² de pressão de água de médio, levando em consideração o mesmo ponto. Já os valores de recuperação mássica e recuperação metalúrgica foram superiores nos testes descritos pelo Gráfico 1, sem água de lavagem

Gráfico 1- Resultados dos testes *rougher* de 1 a 7

Fonte: Autoria própria

Gráfico 2- Resultados dos testes *rougher* de 8 a 14

Fonte: Autoria própria

Foram avaliados os valores de seletividade de todas as matrizes dos testes e comparadas com a pressão da água de médio. Conforme descritos na Tabela 5 e no Gráfico 3, o melhor resultado de seletividade foi na matriz 3,8 mm Mega BigFLUX® com a pressão de água de médio igual zero. Por outro lado, o pior resultado foi com a matriz 0,5 mm Giga BigFLUX®. As matrizes 0,5 mm Super BigFLUX®, 1,1 mm Super BigFLUX® atingiram os maiores resultados de índice de seletividade, com valores superiores a 4, que são valores comuns na prática indústria igual ou maior que 4 (Gaudin, 1939),

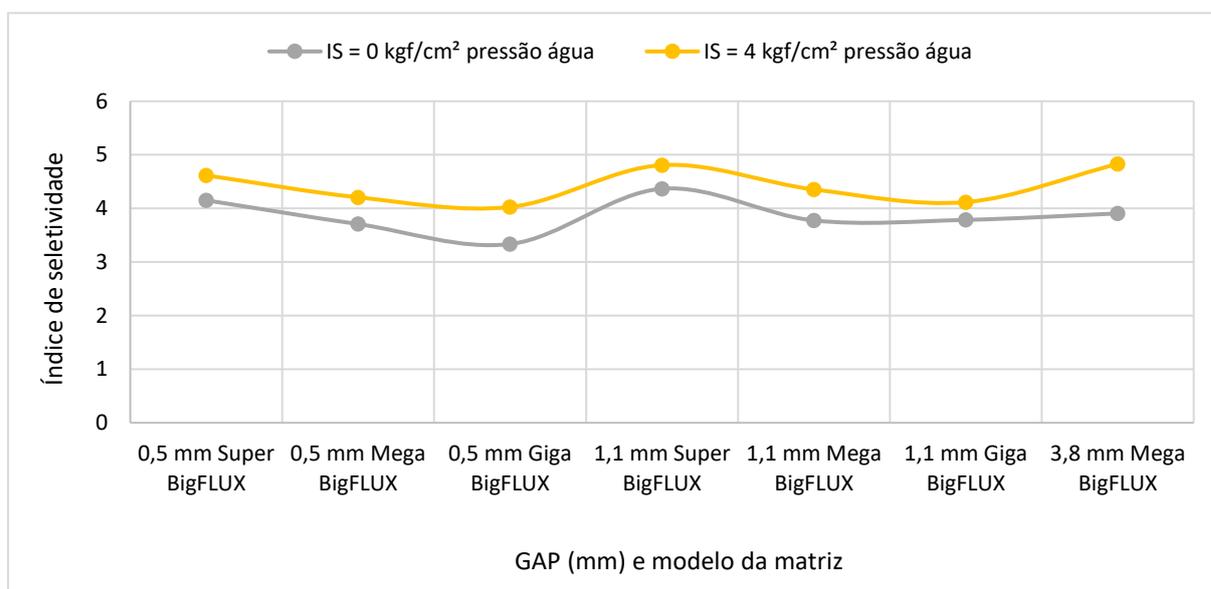
utilizando ou não água de médio. De maneira geral, ao utilizar água de lavagem de médio, o índice de seletividade de seletividade aumentou, conforme descrito no Gráfico 3.

Tabela 5 – Índice de seletividade

<i>GAP</i> (mm)	0,5 mm Super BigFLUX	0,5 mm Mega BigFLUX	0,5 mm Giga BigFLUX	1,1 mm Super BigFLUX	1,1 mm Mega BigFLUX	1,1 mm Giga BigFLUX	3,8 mm Mega BigFLUX
IS 0 pressão água	4,16	3,71	3,33	4,37	3,78	3,79	4,83
IS 4 pressão água	4,62	4,21	4,03	4,81	4,35	4,12	3,91

Fonte: Autoria própria

Gráfico 3 – Índice de seletividade dos testes *rougher* 1 a 14



Fonte: Autoria própria

O objetivo de conseguir um concentrado de qualidade foi alcançado com a matriz 3,8 mm BigFLUX® no teste *rougher* 14, onde os teores de ferro e sílica no concentrado foram 66,63% e 1,65% respectivamente. O rejeito desse teste foram 43,24% de ferro e 15,59% de sílica. Sendo assim, pode-se tratar o rejeito *rougher* afim de gerar outro concentrado para fazer um *blend* com o concentrado *rougher*.

6 CONCLUSÃO

Com base na análise dos resultados, torna-se evidente a relevância da utilização da água de lavagem de médio na separação magnética, uma vez que ela influencia diretamente os resultados dos testes. A utilização de água de lavagem no médio, resultou em melhorias significativas nos teores de ferro no concentrado, embora isso tenha sido contrabalanceado por uma diminuição na recuperação em massa.

No que diz respeito aos modelos das matrizes, destacaram-se dois comportamentos distintos. A matriz 3,8 mm Mega BigFLUX® demonstrou ser a mais eficaz em alcançar um teor de ferro no concentrado de 66,63% com a água de médio aberta. Por outro lado, a matriz 1,1 Super BigFLUX®, apresentou a melhor recuperação mássica, atingindo 56,7% quando a água de médio estava fechada.

Outro ponto importante para analisar é o comportamento do campo magnético. Foram utilizados os campos máximos atingidos com cada matriz em equipamentos industriais. Observou-se que os gaps mais fechados apresentaram uma maior eficiência nas linhas de campo magnético, conseguindo atingir maiores valores de campo magnético, que são primordiais na recuperação de minérios mais finos. Observou-se que a matriz 3,8 mm Mega BigFLUX®, com um campo de 13000 Gauss, obteve o melhor resultado de teor de ferro, o que pode ser atribuído à maior seletividade magnética causada pelo aumento no tamanho dos dentes desta matriz em comparação com outras, uma vez que gaps mais fechados com campos mais altos podem arrastar partículas de rejeito para o concentrado, levando a diminuição do teor de ferro no concentrado.

O objetivo de um concentrado de qualidade foi alcançado para todas as matrizes, destacando-se a matriz 3,8 mm Mega BigFLUX®, onde os teores de ferro e sílica no concentrado foram 66,63% e 1,65% respectivamente. No rejeito, foram registrados teores de 43,24% de ferro e 15,59% de sílica. O que indica uma etapa scavenger para o tratamento desse rejeito para aproveitar o metal contido nessa fração.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, L. C. R.; MARQUES, E. A. G.; PEIXOTO, R. A. F. Perspectivas para o reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro como materiais de construção. *GEOgrafias* [Internet]. v. 12, n.1, p. 32-44, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/geografias/article/view/13413>. Acesso em: 1 set. 2022

APAZA, F. R.; GUIMARÃES, A. C. R.; SOUSA, M. A. S.; CASTRO, C. D. Estudo sobre a utilização de Resíduo de Minério de Ferro em microrrevestimento asfáltico. *Transportes*, v. 26, n.2, p.118–138, 2018. DOI: 10.14295/transportes.v26i2.1254. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1254>. Acesso em: 27 jul. 2023.

ARAUJO, C. B. *Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro*. 2006. 133 f. Dissertação (Mestrado em 2016). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BAKULAMBA DEVI T.S. et al., 2015, “An Experimental Study on Utilization of Iron Ore Tailings (IOT) and Waste Glass Powder in Concrete”, *Civil and Environmental Research*, v.7, n.9. pp. 18-21.

BEZERRA, C. G. *Caracterização do rejeito de minério de ferro (IOT) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pastas de cimento*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

BRASIL, 2012, Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Federal, Governo. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir1529/PNRS_consultaspublicas.pDf> Acesso em: 09 ago. 2023.

CALLISTER JUNIOR, W.D., RETWISCH, D. G., **Ciências de engenharia de materiais. Uma introdução**. Portuguese edition copyright ©2016 by LTC __ Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 9 edição. 910 p.

COSTA, A.V., GUMIERI, A. G., BRANDÃO, P.R.G. Piso intertravado produzido com rejeito de sinter feed. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. v.7, n.2, p. 244-259, 2014.

DAS, S. K., KUMAR, S., RAMACHANDRARAO, P. Exploitation of iron ore tailing for the development of ceramic tiles. *Waste Management*. v. 20, n.8, pp. 725-729, 2000.

DE SÃO JOSÉ, F.; OLIVEIRA, C. G.; PEREIRA, C. A. 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*, v. 13, p. 296-301, 2016.

FERRANTE, F. Estudo de viabilidade para recuperação de minério de ferro em rejeitos contidos em barragens. 2014. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

FERREIRA, K. C. *et al.* Estudos do aproveitamento de rejeitos de um minério de ferro itabirítico da região de morro do Pilar. *Holos*, v. 2., n. 32, pp.77-83, 2016.

FONTES, W. C. *Utilização do rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento*. Dissertação (Mestrado em 2013) Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

Gaudin A. M. *Principles of mineral dressing*. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1939.

GAUSTEC, **EMPRESA** Disponível em: <<https://gaustec.com/a-empresa/>>. Acesso em: 12 ago. 2023.

GUIMARÃES, N. C., VALADÃO, G. E., PERES, A. E. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas, *Revista Escola de Minas*, v. 65, n. 4, p. 543-548, 2012.

INBRAS, Separador Magnético **WDRE**. Disponível em: <<https://inbras.com.br/separador-magnetico-de-tambor-de-alta-intensidade-via-umida-separador-wdre/>>. Acesso em: 12 ago. 2023.

DE OLIVEIRA, I. C. S, FAXINA, A. L. Rejeito de minério de ferro como agregado mineral fino em misturas asfálticas. *Transportes*, [S. l], v. 29, n.3 p. 2391, 2021. DOI: 10.14295/transportes.v29i4.2391. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2391>. A acesso em: 30 ago 2022.

PORTES, A. M. C. Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta. 2013. 154 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

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

RODRIGUES, G. H. G. Concentração Magnética de Alta Intensidade (WHIMS) para Rejeito de Ferro com a Tecnologia Super BigFLUX® Gaustec Magnetic Technology. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2022.

RODRIGUES, G. H. G.; NOGUEIRA, F. C.; MATOS, V. E. ; NOGUEIRA, S. C. S.; PEREIRA, C. A. Separação magnética de alta intensidade para concentração de rejeito de minério de ferro. In: ABM Week 2023, 2023, São Paulo. ABM Week 2023. São Paulo: ABM, 2023. v. 1. p. 203-210.

RIBEIRO, J. P.; RIBEIRO, C. H. T. New-mega-sized wet high intensity magnetic separator a cost-effective solution to reclaim iron ore fines from tailings dams. *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 66, n. 4, out./dez., 2013, p. 529-533.

RIBEIRO, J.P; RIBEIRO, C.H.T. GX-3600: **o maior separador magnético do mundo - até 800 t/h**. *Revista da Escola de Minas*, Ouro Preto, 691-694, out. dez. 2010.

RUYTERS, S.; MERTENS, J.; VASSILIEVA, E.; DEHANDSCHUTTER, B.; POFFIJN, A.; SMOLDERS, E. *The red mud accident in Ajka (Hungary): plant toxicity and trace metal bioavailability in red mud contaminated soil*. *Environmental science & technology*, v. 45, n.4, p. 1616-1622.

SAMPAIO, J. A. E LUZ, A. B. Separação magnética e eletrostática. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. (Ed.). *Tratamento de Minérios*. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p. 303-335.

DOS SANTOS, C. R.; AMARAL FILHO, J. R.; TUBINO, R. M. C.; SCHNEIDER, I. A. H. Use of Coal Waste as Fine Aggregates in Concrete Paving Blocks. *Geomaterials*, v.3, n.2, p. 54–59.

SILVA, J. P.M. Aplicação de separação magnética de alta intensidade (WHIMS) no beneficiamento de itabiritos pobres. 2014. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014.

SILVA, R. M. R.; NUNES, R. M.; NOGUEIRA, F. C.; SILVA, F. L. Aproveitamento do rejeito de minério de ferro da Mina do Andrade para a confecção de blocos intertravados. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 20, e2660, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20222660>. Acesso em: 12 julho 2023.

SILVA, P. M. A.; VIANA, P. J.; CAVALCANTE, L. B. A., 2011, Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração.

SVOBODA, J. et al. **Recent developments in magnetic methods of material separation.** *Minerals Engineering* 2003, Volume 16: páginas 785-792 – Elsevier.

WANG, C.; HARBOTTLE, D.; LIU, Q.; XU, Z. Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice. *Minerals Engineering*, 58, p. 113-131, 2014.

WISE URANIUM PROJECT, 2017. Chronology of Major Tailings Dam Failures. Disponível em: Acesso em: 07 out. 2017.

ZHANG, S. H.; XUE, X. X.; JIN, Z. F. Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailings resources in our country. *Journal of Mining Science*, v. 42,, 2004,

ZHANG, S., XUE, X., LIU, X. *et al.* Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources. *Journal of Mining Science*, v.42, p. 403–408, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10913-006-0069->. Acesso em: ago. 2023.