

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



# CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA DE ALTA INTENSIDADE (WHIMS) PARA REJEITO DE FERRO COM A TECNOLOGIA SUPER BIGFLUX® GAUSTEC MAGNETIC TECHNOLOGY

Ouro Preto, MG 2022

# GUILHERME HENRIQUE GUALANDI RODRIGUES

# CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA DE ALTA INTENSIDADE (WHIMS) PARA REJEITO DE FERRO COM A TECNOLOGIA SUPER BIGFLUX® GAUSTEC MAGNETIC TECHNOLOGY

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção de Grau em Engenharia de Minas.

Orientadora: Dra. Francielle Câmara Nogueira Coorientador: Leandro Matos Caldeira

Ouro Preto, MG 2022

#### SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G899c Gualandi, Guilherme Henrique Rodrigues. Concentração magnética de alta intensidade (WHIMS) para rejeito de ferro com a tecnologia Super Bigflux® Gaustec Magnetic Technology. [manuscrito] / Guilherme Henrique Rodrigues Gualandi. - 2022. 75 f.: il.: color., gráf., tab..
Orientadora: Profa. Dra. Francielle Câmara Nogueira. Coorientador: Leandro Caldeira Matos. Monográfia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .
1. Beneficiamento de minério - Separação magnética. 2. Rejeitos (Mineração). 3. Minério de ferro. 1. Matos, Leandro Caldeira. II. Nogueira, Francielle Câmara. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas Departamento de Engenharia de Minas - DEMIN



#### ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos dez dias do mês de março de 2022, às 19h00min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente Guilherme Henrique Gualandi Rodrigues, matrícula 16.1.1519, intitulado: "CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA DE ALTA INTENSIDADE (WHIMS) PARA **REJEITO DE FERRO COM A TECNOLOGIA SUPER BIGFLUX® GAUSTEC** MAGNETIC TECHNOLOGY", perante comissão avaliadora constituída pela orientadora do trabalho Profª Drª Francielle Câmara Nogueira; Engº de Minas Leandro Caldeira Matos; M. Sc. Karine Fernandes Rodrigues e Engº de Minas Renato Martins. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Incialmente, a presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, a presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro ao Engº de Minas Leandro Caldeira Matos, segundo, à M. Sc. Karine Fernandes Rodrigues, Terceiro, ao Engº de Minas Renato Martins e em último, a Profª Drª Francielle Câmara Nogueira. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, a presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi aprovado por unanimidade, com a nota 9,8 (nove, vírgula, oito pontos). O discente, por sua vez, encaminhará para o Repositório Institucional da UFOP, no prazo máximo de 15 dias, uma versão final, contemplando todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pelo presidente da comissão.

Ouro Preto, 10 de março de 2022.

Presidente: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Prancielle Câmara Nogueira Membro: Eng<sup>o</sup> de Minas Leandro Caldeira Matos Membro: M. Sc. Karine Fernandes Rodrigues Membro: Eng<sup>o</sup> de Minas Renato Martins Discente: Guilherme Henrique Gualandi Rodrigues

Ao meu querido pai, Juliano Cesar Lopes Rodrigues, e à minha querida mãe, Norma de Oliveira Gualandi Rodrigues.

### AGRADECIMENTOS

Ao único Deus que é digno de toda glória, o Deus imortal e invisível. Majestade e poder ao Rei eterno. Seja honra e glória para todo o sempre.

Aos meus pais, Juliano Cesar Lopes Rodrigues e Norma de Oliveira Gualandi Rodrigues, e à minha irmã, Rhayssa Gualandi Rodrigues, por serem meu alicerce nessa grande jornada e contribuírem para o meu crescimento profissional e pessoal.

Ao meu avô materno, José Gualandi, pelas histórias que me cativaram a querer ser engenheiro.

À minha falecida avó, Antónia Francisca de Oliveira Gualandi, que sonhava com o neto engenheiro.

Aos meus avós paternos, Mário Cesar Lopes Rodrigues e Madalena Lopes Rodrigues, por todo apoio e carinho.

Aos professores e amigos queridos Carlos Alberto Pereira, Francielle Câmara Nogueira, Fábio de São José e Kennedy Ramos, por todo aprendizado, dedicação e, principalmente, paciência por me suportarem por tanto tempo.

Aos meus amigos camaradas Matheus Gomes, Thiago Neves, Thiago Duarte, Paulo Liberato, Caio Gonzaga, Gustavo Bruno, Bruno Tonsa, Érica Rocha, Fernanda Hoffmann, Bruna Rodrigues, Ítalo Oliveira, Vitor Maia, Átila Castro, entre outros, pelo grande apoio fundamental ao longo da minha trajetória acadêmica.

À Fundação Gorceix, em especial ao Renato Rodrigues e ao Wellington Fernando, pelo grande apoio durante meu percurso acadêmico.

À Gaustec Separação Magnética, em especial ao José Pancrácio e seus filhos, a Wellington Alves, Leandro Caldeira, Tonnys Ricard, Dárcio Tameirão, Bernardo Felipe, Raissa Mendes, Márcia Almeida, Claudio Pereira, Denílson, Rosangela, Matheus Antônio e Macsuel Agostinho, pela enorme contribuição em minha vida profissional, acadêmica e pessoal.

À empresa Itaminas Comércio de Minérios, pelo material cedido, pelas análises químicas e pelo apoio técnico.

Aos integrantes Gedeon, Renilda, Ana e Sheyla Ramos, pela amizade e contribuição no trabalho.

Aos meus amigos e colaboradores do laboratório da Universidade Federal de Ouro Preto, Luiz Cláudio do Sacramento, Antônio Pedro de Freitas, Mariana C. Andrade Silva, por toda disposição e contribuição nos ensaios.

À Universidade Federal de Ouro Preto e à Escola de Minas, pela excelência no ensino acadêmico e profissional.

"Eu sou a videira, vós as varas; quem está em mim, e eu nele, esse dá muito fruto; porque sem mim nada podeis fazer." (João 15:5)

"Combati o bom combate, acabei a carreira, guardei a fé. Desde agora, a coroa da justiça me está guardada, a qual o Senhor, justo juiz, me dará naquele Dia." (2 Timoteo 4:7-8)

### **RESUMO**

O rejeito final proveniente do beneficiamento da Mineração Itaminas Comércio de Minérios, localizada na região rural da cidade de Sarzedo (MG), apresenta um elevado teor de ferro, próximo ao teor de alimentação da usina. Em função do empobrecimento natural das jazidas ao longo dos anos, devido à lavra predatória e escassez de minérios ricos, a concentração mineral vem se tornando cada vez mais complexa e desafiadora, necessitando de novas tecnologias capazes de concentrar o bem de interesse. Devido a isso, o grau de liberação das partículas vem se tornando mais complexa e desafiadora devido a necessidade de cominuir cada vez mais o minério, dificultando a concentração e causando o enriquecimento do rejeito. Dada essa situação, a separação magnética começou a se tornar obsoleta para a concentração de finos de minério de ferro e, principalmente, o beneficiamento do rejeito rico das usinas, devido à ineficiência do campo gerado, ao baixo gradiente das matrizes, à baixa taxa de alimentação e principiante à inviabilidade técnica em diminuir o tamanho dos GAPs. As matrizes convencionais apresentam entupimento por granulometria com GAPs menores que 1,5 mm, tornando o processo ineficiente na recuperação de partículas finas e até mesmo para partículas mais grosseiras, além do baixo campo gerado, devido ao modelo comum das matrizes – o que poderia indicar o fim da tecnologia de concentração magnética de minério fino de ferro. Dessa maneira, a Gaustec Tecnologia Magnética buscou atuar de maneira efetiva nos grandes desafios de concentração magnética de alta intensidade via úmida (WHIMS): campo magnético, taxa de alimentação, gradiente, área volumétrica das matrizes e GAPs menores que 1,5 mm em escala industrial. Portanto, o presente trabalho tem como principal objetivo, realizar o estudo com o rejeito fino da Itaminas e comprovar a viabilidade técnica em concentrar e recuperar os finos de minério de ferro não capturados no atual circuito de processo de beneficiamento da Mineração Itaminas. A metodologia aplicada baseia-se na caracterização do material e nos ensaios de concentração magnética pelo concentrador em escala piloto Minimag<sup>®</sup> com as matrizes 0.5 mm Super BigFLUX, buscando a recuperação de teores de ferro e sílica que se adequem às especificações de mercado, por uma nova rota de concentração desse rejeito de minério de ferro. Os ensaios iniciais apresentaram um moderado índice de magnetismo do rejeito de minério de ferro, principalmente nas granulometrias superiores a fração 0,6 mm, o qual não deveria estar presente no fluxo de rejeito devido ao corte granulométrico realizado pelos hidrociclones. Os testes em escala piloto apresentaram viabilidade técnica de processamento de rejeito com duas etapas (rougher e cleaner), com GAP de 0,5 mm Super BigFLUX na ordem dos 20000 Gauss, podendo alcançar teor superior a 63 % de Fe no concentrado e recuperação mássica global acima de 10%, o que pode implicar em um ganho na produção anual de aproximadamente 254 t, que pode variar de acordo com a taxa de alimentação da usina (ITM-08).

Palavras-chave: Gaustec. Separação Magnética. WHIMS. Super BigFLUX. Rejeito.

### ABSTRACT

The final tailings from the processing of Mineração Itaminas Comércio de Minériogg, located in the rural region of the city of Sarzedo (MG), has a high iron content, close to the feed content of the plant. Due to the natural impoverishment of the deposits over the years, due to predatory mining and scarcity of rich ores, mineral concentration has become increasingly complex and challenging, requiring new technologies capable of concentrating the good of interest. Because of this, the degree of release of the particles has become more complex and challenging due to the need to comminulate the ore more and more, hindering the concentration and causing the enrichment of the tailings. Given this situation, the magnetic separation began to become obsolete for the concentration of iron ore fines and, mainly, the processing of the rich tailings of the plants, due to the inefficiency of the generated field, the low gradient of the matrices, the low feed rate and novice to the technical unfeasibility in reducing the size of the GAPs. Conventional matrices present granulometry clogging with GAPs smaller than 1.5 mm, making the process inefficient in the recovery of fine particles and even for coarser particles, in addition to the low field generated, due to the common model of the matrices - which could indicate the end of the magnetic concentration technology of fine iron ore. Thus, Gaustec Tecnologia Magnética sought to act effectively in the great challenges of high intensity magnetic concentration via wet (WHIMS): magnetic field, feed rate, gradient, volumetric area of the matrices and GAPs smaller than 1.5 mm on an industrial scale. Therefore, the main objective of this work is to carry out the study with the fine tailings of Itaminas and to prove the technical feasibility of concentrating and recovering the iron ore fines not captured in the current process circuit of the beneficiation process of Mineração Itaminas. The methodology applied is based on the characterization of the material and magnetic concentration tests by the Minimag pilot scale concentrator® with the 0.5 mm Super BigFLUX matrices, seeking the recovery of iron and silica contents that meet the market specifications, by a new concentration route of this iron ore tailings. The initial tests showed a moderate index of iron ore tailings magnetism, especially in the granulometry greater than 0.6 mm fraction, which should not be present in the tailings flow due to the granulometric cut performed by hydrocyclones. The pilot scale tests showed technical feasibility of two-stage tailings processing (rougher and cleaner), with gap of 0.5 mm Super BigFLUX in the order of 20000 Gauss, and can reach a content greater than 63 % of Fe in concentrate and overall mass recovery above 10%, which may imply a gain in annual production of approximately 254 t, which may vary according to the power rate of the plant (ITM-08).

Keywords: Gaustec. Magnetic separation. WHIMS. Super BigFLUX. Reject.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espira circular - direção e sentido do campo magnético em relação a corrente elétrica	18
Figura 2 – Orientação do campo magnético em relação a direção da corrente elétrica na espira	.19
Figura 3 – Linhas de força de um campo magnético ao redor de um ímã	19
Figura 4 – Campo gerado através de espiras	21
Figura 5 – Momento angular oposto entre si	23
Figura 6 – Curvas de magnetização para monocristais de ferro	24
Figura 7 – Alinhamento magnético	25
Figura 8 – Densidade de Fluxo em Função da Intensidade do Campo Magnético	26
Figura 9 – Representação dos dipolos induzidos por um campo externo	26
Figura 10 – Representação dos Dipolos alinhados por um Campo Externo	28
Figura 11 – Densidade de Fluxo em Função da Intensidade do Campo Magnético	29
Figura 12 – Alinhamento mútuo de dipolos atômicos para um material ferromagnético em	
ausência de H	31
Figura 13 – Ordenamento antiferromagnético	32
Figura 14 – Alinhamento antiparalelo de momentos magnéticos de spin para o óxido de	
manganês antiferromagnético	32
Figura 15 – Gráfico da magnetização de saturação em função da temperatura para o ferro e o	
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	34
Figura 16 – Representação esquemática de domínios em um material ferromagnético ou	
ferrimagnético; as setas representam os dipolos magnéticos atômicos	35
Figura 17 – Comportamento dos domínios de um material ferromagnético com o aumento do	
campo magnético atuante	35
Figura 18 – Ciclo de Histerese: Densidade de fluxo magnético (B) versus campo magnético	
incidente (H) para um material ferromagnético	36
Figura 19 – Curvas esquemáticas de magnetização para materiais magnéticos moles e duros	37
Figura 20 – Separadores magnéticos do tipo carrossel com vista vertical - (A) modelo	
tetrapolar (B) modelo hexapolar	41
Figura 21 - Matriz magnética	42
Figura 22 – Dimensões básica das matrizes	42
Figura 23 - (A) - Matriz comum (B) - Matriz SuperBigFLUX (Pancrácio)	44
Figura 24 – Fluxograma simplificado - Itaminas Comércio de Minério S/A	48
Figura 25 - Fluxograma do rejeito final Itaminas	49

Figura 26 - Coleta das amostras Itaminas	50
Figura 27 - Tanque de homogeneização de polpa	50
Figura 28 - Fluxograma do planejamento das alíquotas	51
Figura 29 - Concentrador magnético Minimag <sup>®</sup> Gaustec	53
Figura 30 – Análise granulométrica amostra global do rejeito	56
Figura 31 – Fotografia através da lupa binocular das partículas de rejeito (aumento 2x)	57
Figura 32 – Análise mineralogia do rejeito final – Itaminas Comercio de Minérios S/A	58
Figura 33 – Separação magnética com ímã de mão (fração +0,6 mm)	59
Figura 34 – Separação magnética com ímã de mão (fração +0,15 mm)	60
Figura 35 – Separação magnética com ímã de mão fração (+0,038 mm)	60
Figura 36 – Imagem da fração retido em 0,038 mm em uma lupa binocular (aumento 2x)	61
Figura 37 – Rejeito utilizado nos testes de separação magnética	62
Figura 38 – Resultados dos testes de concentração magnéticas – etapa rougher	62
Figura 39 – Influência da vazão de polpa, água de lavagem e rotação na qualidade e	
recuperação mássica dos produtos	63
Figura 40 – Resultados dos testes de concentração magnética da etapa <i>cleaner</i>	65
Figura 41 – Gráfico comparativo – Água de lavagem de médio x sólidos x campo magnético	X
qualidade x recuperação mássica	66
Figura 42 – Taxa de enriquecimento e recuperação mássica global	67
Figura 43 – Gráfico comparativo entre recuperação em massa e recuperação mássica pela	
química e a recuperação metalúrgica	68
Figura 44 – Fluxograma simplificado (proposto para tratamento de rejeito)	69

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Grupo magnético dos materiais	24
Tabela 2 - Índice de Susceptibilidade Magnética Diamagnética	27
Tabela 3 – Índice de Susceptibilidade Magnética Paramagnética	29
Tabela 4 – Série de peneiras utilizadas na análise granulométrica do material	52
Tabela 5 – Parâmetros dos testes da etapa <i>rougher</i>	54
Tabela 6 - Parâmetros dos testes <i>cleaner</i>	55
Tabela 7 – Análise química da amostra global e análise granulométrica	57

I. INTRODUÇAO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo geral	17
2.2 Objetivos específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 Fundamentos teóricos do magnetismo	18
3.1.2 Campo magnético	18
3.1.3 Dipolos magnéticos	19
3.1.4 Vetores do campo magnético	19
3.1.5 Mecânica quântica	21
3.1.6 Anisotropia magnética	23
3.1.7 Propriedades magnéticas	24
3.1.8 Influência da temperatura no comportamento magnético	33
3.1.9 Domínios magnéticos	34
3.1.10 Histerese	
3.1.11 Magnetismo dos materiais	37
3.2 Principais minerais de ferro	
3.2.1 Magnetita	
3.2.2 Hematita	
3.2.3 Goethita	
3.2.4 Limonita	40
3.3 Gaustec tecnologia magnética	40
3.3.1 Separadores magnéticos da Gaustec	41
3.3.2 Matriz comum (8r) e Super BigFLUX <sup>®</sup>	42
3.4 Aplicação da concentração magnética de alta intensidade (WHIMS)	45
4. MATERIAIS E MÉTODOS	47
4.1 Amostragem e preparação das amostras	47
4.2 Análise granulométrica	51
4.3 Análise química e mineralógica	52
4.4 Ensaios de concentração magnética – Ímã de mão e concentrador magnético Min Gaustec	imag® 52
4.4.1 Preparação dos ensaios de separação magnética – Etapa rougher	53
4.4.2 Etapa <i>cleaner</i>	54
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1 Análise granulométrica	55
5.1.2 Análise química	56

# SUMÁRIO

5.1.3 Análise mineralógica	
5.2 Ensaios magnéticos	
5.2.1 Ensaios com ímã de mão	
5.2.2 Ensaios de concentração magnética – Etapa Rougher	61
5.2.3 Ensaios de concentração magnética – Etapa Cleaner	64
6. CONCLUSÕES	70
REFERÊNCIAS	72

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a mineração é uma das principais atividades responsável pela geração dos maiores impactos socioambientais e econômicos do país. Devido às grandes tragédias de rupturas de barragens no país, foi sancionada a Lei 14.066 de 2020, que proíbe a construção de barragens do tipo a montante (nas quais o rejeito compõe o corpo da barragem de forma alteada, sentido contrário ao fluxo). O novo código da mineração estabelece que as empresas apresentem formas para a disposição do rejeito gerado após o beneficiamento do minério e uma das grandes dificuldades é a disponibilidade de áreas para o empilhamento de rejeito filtrado.

De acordo com Azam e Li (2010), cerca de 1,2% das barragens de mineração apresentaram algum tipo de falha, enquanto as barragens civis apresentaram 0,01%. Isso se deve à estrutura física de construção de cada barragem, já que a barragem de resíduo é constituída por solo compactado com um sistema de drenagem, e a barragem civil, por sua própria natureza, tem características técnica de projeto o concreto e, assim, não sofre modificações em sua estrutura civil, ou seja, o fator de segurança é maior, portanto, o investimento nesse tipo de estrutura é maior.

Os separadores magnéticos mais antigos não conseguiam processar materiais finos e pobres devido ao baixo campo produzidos pelas matrizes comuns e pela baixa taxa de alimentação. Como as jazidas estão se tornado cada vez mais complexas, pobres e com baixa granulometria, necessita-se de métodos eficazes para a concentração de finos. A não eficiência na concentração do minério ocasiona rejeitos com elevados teores do bem desejado, o que implica no aumento da massa de rejeito gerada e no desperdício do bem natural.

Atualmente, a Gaustec Tecnologia Magnética, tem desenvolvido estudos relacionados à otimização do campo magnético dentro das matrizes e da capacidade volumétrica das máquinas. As novas tecnologias de matrizes permitem operar em escala industrial GAPs inferiores a 1,5 mm, assim, atua na captura de partículas menores que 0,15 mm e possibilita gerar um rejeito mais pobre (ou o reprocesso desse rejeito) e diminuir a quantidade de massa a ser empilhado após a filtragem.

A empresa criou a maior máquina de concentração magnética do mundo, o GHX-1400, capaz de processar 1400 t/h de alimentação. Tal equipamento apresenta 12 pontos de alimentação,

devido aos seus 12 polos magnéticos. Além das tecnologias dos concentradores, a Gaustec também apresenta as matrizes com design próprio capaz de elevar o gradiente e o campo magnético, chegando a valores superiores a 20.000 Gauss, a nível industrial.

Um exemplo da modificação das matrizes é a criação das matrizes Super BigFLUX (pitch = 5,5 cm), que possui um aumento de área 3 vezes em relação à matriz convencional (pitch = 3,175 cm). Esse aumento de área proporcionou a proteção contra entupimento por granulometria, permitindo uma alimentação por partículas maiores que o GAP da matriz.

Dentro dessa nova perspectiva das minerados, que buscam a produção de rejeito zero através da geração de subprodutos ou, ainda, diminuição máxima do teor do elemento desejado no rejeito final, a concentração magnética vem se apresentando como uma alternativa viável para beneficiar o rejeito do processamento mineral.

Com isso, o presente trabalho teve como foco estudar a aplicação da matriz 0,5 mm Super BigFLUX com objetivo de apresentar uma nova rota de processo para o rejeito final da Itaminas Comércio de Minérios.

### **2. OBJETIVOS**

# 2.1 Objetivo geral

O presente trabalho teve como objetivo geral estudar a separação magnética de alta intensidade (WHIMS) com a tecnologia Super BigFLUX<sup>®</sup> da Gaustec Magnetic Technology, para o rejeito de ferro com granulometria inferior a 150 µm.

# 2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- i) caracterizar do rejeito de ferro oriundo da Mineração Itaminas;
- avaliar no separador do tipo Jones (MiniMag<sup>®</sup>), com a matriz de GAP 0.5 mm
   Super BigFLUX<sup>®</sup>, realizando etapas *rougher* e *cleaner*, a possibilidade de alcançar um concentrado com 62% de Fe e 10% de SiO<sub>2</sub>;
- iii) definir uma nova rota de processo para o rejeito filtrado.

# 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura relacionada aos temas relevantes a este trabalho de conclusão de curso.

## 3.1 Fundamentos teóricos do magnetismo

Conhecido também como uma forma de energia, o magnetismo está diretamente envolvido com a atração e repulsão entre particulares de materiais, podendo ser natural ou artificial (temporários ou permanentes).

Dessa maneira, o magnetismo de qualquer material está relacionado aos elétrons presentes nele, e esses elétrons produzem um campo magnético pelo movimento interno do átomo (Silva, 2012).

# 3.1.2 Campo magnético

O movimento de uma carga elétrica é responsável pela criação de um campo magnético, conforme apresentado pela Figura 1. Esse fato pode ser explicado, devido ao elevado número de cargas elétricas que se movimenta no interior de um condutor, gerando um campo magnético individual para cada carga, e, por fim, a soma deles implica no campo magnético resultante.

Portanto, uma espira percorrida por uma corrente elétrica induz um campo magnético análogo ao do ímã. Com um polo norte onde as linhas saem e um polo sul aonde as linhas chegam.





Fonte: Gomes (2012).

Um conjunto de espiras é denominado solenoide (Figura 2), o qual gera uma bobina que apresenta a mesa corrente em cada espira.

Figura 2 - Orientação do campo magnético em relação a direção da corrente elétrica na espira



Fonte: Gomes (2012).

### 3.1.3 Dipolos magnéticos

A força magnética é gerada pelo movimento de partículas carregadas eletricamente e sendo aditiva a quaisquer forças eletrostáticas que possam existir. Portanto, é conveniente pensar na força magnética em termos de campo. Na Figura 3, é possível observar no ímã as linhas que indicam a direção da força semelhante a uma corrente circular.

Figura 3 – Linhas de força de um campo magnético ao redor de um ímã



Fonte: Mussoi (2005).

# 3.1.4 Vetores do campo magnético

A intensidade do campo magnético (H) é o termo utilizado quando, o campo é aplicado de forma externa e se o campo magnético for gerado por meio de uma bobina cilíndrica ou solenoide (Equação 1).

$$H = \frac{NI}{l} \tag{1}$$

Onde: N: Número de espiras L: Comprimento da Bobina I: Corrente

A densidade do fluxo magnético ou indução magnética (B) apresenta a magnitude do campo interno de uma substância que está sujeita a um campo H. Sendo assim, tanto B quanto H são vetores de campo com direção e magnitude (Equação 2).

$$B = \mu H \tag{2}$$

Permeabilidade ( $\mu$ ) é uma propriedade do meio específico onde o campo magnético passa e a densidade do fluxo magnético é medida. A razão entre a permeabilidade de um material e a permeabilidade do vácuo é conhecido como permeabilidade relativa, ou seja, um parâmetro adimensional. Portanto, a permeabilidade mensura o grau de magnetização de um determinado material quando exposto a uma presença de um campo externo.

A Figura 4 representa o campo gerado pela bobina, relacionado com a corrente, número de espiras e comprimento da bobina. A densidade do fluxo magnético ( $B_0$ ) na presença do vácuo é igual a  $\mu_0 H$  e a permeabilidade do vácuo ( $\mu_0$ ) é igual a  $4\pi 10^7 H/m$ . Portanto, no interior de um material sólido, a permeabilidade passa a ser do sólido e não do vácuo.



Figura 4 – Campo gerado através de espiras

A magnetização, dada pela Equação 3, é outra grandeza de campo que, na presença de um campo externo, os momentos magnéticos no interior de um material tendem a ficar alinhados com o campo. Logo, a magnitude é proporcional ao campo aplicado e a susceptibilidade magnética ( $X_M$ ), conforme a Equação 4.

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \tag{3}$$

$$M = X_M H \tag{4}$$

## 3.1.5 Mecânica quântica

O spin é considerado um número quântico presente em partículas subatômicas que pode ser tratado como uma grandeza vetorial quantizada (módulo, direção e sentido) que apresenta direções norte e sul de campo magnético.

As equações do eletromagnetismo de Maxwell inferem que, se alguma partícula apresenta um campo magnético intrínseco, significa que uma carga em movimento ocasiona um campo, sendo este campo perpendicular à velocidade da partícula e ao campo magnético, existindo, dessa forma, uma movimentação ou rotação interna dessa partícula. O spin é, portanto, um momento angular intrínseco das partículas quânticas sem qualquer analogia clássica (HELERBROCK, 2015).

O elétron não é a única entidade quântica com spin <sup>1</sup>/<sub>2</sub>. Tanto os prótons quanto os nêutrons também possuem spin <sup>1</sup>/<sub>2</sub> mesmo possuindo razões giromagnéticas diferentes (ALCARÁS, 2015).

De acordo com as Equações 5 e 6, s =  $\frac{1}{2}$  gera que o número quântico m =  $\pm \frac{1}{2}$ , assim conhecidos como estados "*UP*" denotado por  $|+\rangle$  ou  $|\uparrow\rangle e$  "*DOWN*" denotado por  $|-\rangle$  ou  $|\downarrow\rangle$ , os quais significam, respectivamente, um alinhamento ou anti-alinhamento do sistema com um campo magnético.

$$\mathbb{S}_{z}\left|\frac{1}{2},-\frac{1}{2}\right\rangle = -\frac{\hbar}{2}\left|\frac{1}{2},-\frac{1}{2}\right\rangle \tag{5}$$

$$\mathbb{S}_{z} \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle = \frac{\hbar}{2} \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle \tag{6}$$

O experimento de Stern-Gerlach demostra a existência da quantização do momento angular. Para isso é necessário entender que um objeto que rotaciona no seu próprio eixo se comporta semelhantemente a um dipolo magnético, conforme a Equação 7, ou seja, é correto afirmar que M é o vetor de momento de dipolo magnético e B o vetor de campo magnético. Dessa maneira, U vai se comportar como valor mínimo quando M e B estiverem em mesma direção e sentido – semelhante ao que ocorre com a agulha da bússola alinhando com o campo da Terra – e U vai se comportar com valor máximo quando M e B estiverem em mesma direção e sentidos opostos.

$$U = -M.B \tag{7}$$

Quando ocorre a atração em direção ao campo, significa que os dipolos estão alinhados com o campo B, o contrário implica repulsão em direção ao campo, ou seja, o momento intrínseco estará alinhando ou não a B.

Ao analisar a tabela periódica, é possível notar os metais de transição, aqueles elementos que possuem subníveis "d" e "f" incompletos em algum de seus estados de oxidação ou que possa vir a formar cátions. Porém, apenas alguns metais 3d formam sólidos magnéticos (Fe, Co e Ni) e os metais 4d ou 5d não são magnéticos, mas contemplam um acoplamento spin-órbita

significante, ou seja, uma interação magnética entre os momentos magnéticos do spin e do momento angular orbital (SANTOS, 2009).

Portanto, quando os momentos angulares são paralelos entre si, os momentos magnéticos apresentam alinhamento desfavorável. Sendo assim, quando os momentos angulares são opostos entre si, os momentos magnéticos terão alinhamento favorável (Figura 5).



Figura 5 – Momento angular oposto entre si

Fonte: Fogaça (2018).

### 3.1.6 Anisotropia magnética

As propriedades físicas dos monocristais de algumas substâncias dependem da direção cristalográfica na qual as medições são feitas. Essa direcionalidade das propriedades é denominada anisotropia e está associada à variação do espaçamento atômico ou iônico em função da direção cristalográfica, ou seja, em funções da assimetria da estrutura cristalina.

Os ímãs atômicos podem se orientar de acordo com certos eixos cristalinos do material, como é o caso do ferro, que pertence ao sistema cúbico cristalino e possui três eixos cristalográficos (anisotrópico) dados pelos seguintes índices de Miller: 100, 110 e 111. Dessa forma, é possível analisar na Figura 6 o eixo 100 como o preferencial e o 111 como a direção menos favorável, ou seja, é preciso uma quantidade de energia elevada para movimentar o ímã da direção preferencial para a menos favorável. É, então, chamada de energia de anisotropia magnetocristalina, sendo ela responsável pela dificuldade na rotação dos momentos atômicos, implicando em uma retenção da magnetização de certos materiais.



Figura 6 - Curvas de magnetização para monocristais de ferro

Fonte: Callister Jr. (2020).

#### 3.1.7 Propriedades magnéticas

De acordo com Tarling (1993), todos os materiais apresentam propriedades magnéticas e sua interação pode ser maior ou menor de acordo com o campo aplicado. A Tabela 1 apresenta os cinco grupos dos materiais de acordo com a susceptibilidade magnética do material.

Tabela 1 – Grupo magnético dos mater			
	Grupos Magnéticos		
	Diamagnéticos		
	Paramagnéticos		
	Ferromagnéticos		
	Antiferromagnéticos		
	Ferrimagnéticos		
H	Fonte: Autoria própria.		

A representação esquemática das cinco propriedades magnética pode ser observada na Figura 7. A imagem (a) apresenta o diamagnético com momento magnético igual a zero; a imagem (b) apresenta paramagnético com momento magnético dos átomos de forma aleatória se anulando; a imagem (c) mostra o momento magnético se alinhando dentro de um domínio bastante semelhante com a imagem (d) que representa o antiferromagnético e a imagem (e), que corresponde ao momento magnético de cada tipo é alinhado.

### Figura 7 – Alinhamento magnético



Fonte: Guy (1972) apud Svoboda (2004).

I. Diamagnético

O diamagnetismo é uma forma muito fraca de magnetismo e ela só existe quando coexiste o campo magnético e independe da temperatura e dos números quânticos de elétrons. É correto afirmar que o diamagnetismo é produto de uma perturbação de um movimento orbital dos elétrons causada pela força que cada elétron experimenta quando se move com velocidade  $\vec{v}$  em um campo magnético  $\vec{H}$  (HOLANDA *et al.*, 2019). Portanto, a magnitude do momento magnético induzido é quase nulo e, consequentemente, ocorre em direção contraria ao H, implicando diretamente em uma suscetibilidade magnética negativa, ou seja, a magnitude do campo B no interior do material diamagnético é menor que no vácuo, representado pela Figura 8. Outra característica interessante do sólido diamagnético é a sua reação ao ser apresentado aos polos de um eletroímã de alta intensidade, no qual a partícula tende a ser atraída em direção aos pontos com campos menores.



Figura 8 – Densidade de Fluxo em Função da Intensidade do Campo Magnético

Fonte: Adaptado de Callister Jr. (2006) apud Rocha (2018).

A Figura 9 apresenta a configuração do dipolo atômico de um material diamagnético. A imagem (a) representa o material na ausência de  $\vec{H}$  e a imagem (b) representa o mesmo material na presença de  $\vec{H}$ . Com isso, é correto afirmar que o diamagnetismo tem a sua existência quando a partícula é apresentada a um campo magnético externo o qual vai induzir dipolos em sentido contrário ao campo, gerando seu próprio campo magnético, porém com polaridade oposta.

Figura 9 - Representação dos dipolos induzidos por um campo externo



Fonte: Adaptado de Callister Jr. (2006) apud Rocha (2018).

Se o campo magnético  $\vec{H}$  for aplicado de forma perpendicular ao movimento do elétron, a força  $\vec{F}$  será centrípeta, variando a velocidade angular do elétron que é diretamente relacionada à variação do momento magnético orbital do elétron.

Quando a contribuição magnética é nula, a permeabilidade relativa  $\mu_r$  tende a ser ligeiramente menor que a unidade e, assim, a magnitude do campo B no interior do material torna-se menor que no vácuo, ou seja, susceptibilidade magnética negativa, conforme apresentada na Tabela 2.

Diamagnéticos		
	Suscetibilidade $\chi_m$	
Material	(volumétrica) (unidades SI)	
Silício	$-0,41 * 10^{-5}$	
Cobre	$-0,96 * 10^{-5}$	
Cloreto de sódio	$-1,41 * 10^{-5}$	
Zinco	$-1,56 * 10^{-5}$	
Óxido de alumínio	$-1,81 * 10^{-5}$	
Prata	$-2,38 * 10^{-5}$	
Mercúrio	$-2,85 * 10^{-5}$	
Ouro	$-3,44 * 10^{-5}$	

Tabela 2 - Índice de Susceptibilidade Magnética Diamagnética

Fonte: Adaptada de Callister Jr. (2020).

Rosental (1971) apresenta em seus estudos que grande parte das moléculas inorgânicas e a grande maioria das moléculas orgânicas apresentam seu diamagnetismo obstruído pelo efeito ferromagnético e/ou paramagnético.

Correlacionando a frequência de Larmor ( $\Delta \omega$ ) e a frequência típica por fórmulas matemáticas, é possível encontrar a magnitude da variação do movimento do elétron. Dessa maneira, a razão entre a frequência típica de movimento do elétron e a frequência de Larmor aponta que a mudança na velocidade é de um para dez mil. Portanto, o efeito diamagnético é quase imperceptível e, mesmo ele se apresentando em todos os materiais, apenas quando o efeito paramagnético for nulo em um determinado material será possível identificar de forma fácil o efeito diamagnético.

Baseado nessa razão, a susceptibilidade magnética é de grande auxílio para se caracterizar o efeito diamagnético através do número atômico (Z), da massa atômica (A), do número de avogadro (N<sub>A</sub>), pelo número de átomos por unidade de volume ( $10^{18} - 10^{30}$  átomos por m<sup>3</sup>), permeabilidade do vácuo ( $\mu o$ ) e da distância média dos elétrons ao núcleo. É possível, então, obter a Equação 8 de susceptibilidade que também independe da temperatura.

$$X = -\frac{\mu o Z e^2 r^2 N_A \rho}{6mA} \tag{8}$$

### II. Paramagnetismo

Paramagnetismo é o fenômeno que alguns materiais apresentam de alinhar os seus momentos magnéticos – até então alinhados de forma aleatória – em direção ao campo, quando submetidos a um campo magnético externo, conforme a Figura 10. É uma propriedade que contribui diretamente na susceptibilidade magnética dos materiais.

Figura 10 - Representação dos Dipolos alinhados por um Campo Externo



Fonte: Adaptado de Callister Jr. (2006) apud Rocha (2018).

Como os dipolos se alinham com o campo externo, eles tendem a aumentar a força magnética, dando origem a uma permeabilidade relativa  $\mu_R$  maior que a unidade, e a uma suscetibilidade magnética que, apesar de ser relativamente pequena, é positiva, conforme apresentado na Figura 11 que mostra uma linha vermelha superior a linha preta tracejada (vácuo).



Figura 11 - Densidade de Fluxo em Função da Intensidade do Campo Magnético

Fonte: Callister Jr. (2020).

A Tabela 3 mostra valores de susceptibilidade magnética para materiais paramagnéticos. É possível perceber que esses materiais apresentam valores baixos e positivos.

Paramagnéticos		
Suscetibilidade xm		
(volumétrica) (unidades SI)		
3,7 * 10 <sup>-3</sup>		
$1,51 * 10^{-3}$		
$3,13 * 10^{-4}$		
$1,81 * 10^{-4}$		
$1,19 * 10^{-4}$		
$1,09 * 10^{-4}$		
$2,07 * 10^{-5}$		
8,48 * 10 <sup>-6</sup>		

Tabela 3 – Índice de Susceptibilidade Magnética Paramagnética

Fonte: Adaptada de Callister Jr. (2020).

De acordo com Holanda *et al.* (2019), foi observada a existência de números ímpares ao somarem os elétrons de materiais paramagnéticos. Com isso, um dos fatores para a existência do fenômeno paramagnético são os elétrons desemparelhados que se localizam em sítios de uma rede cristalina, o que é explicado pela teoria de Curie.

Ainda segundo os autores, a teoria de Curie aborda os elétrons das camadas 4f, onde se origina o paramagnetismo dos matérias, por exemplo: íons de terras raras. Partindo de um sistema com finito número de átomos idênticos com momento angular total  $\vec{J}$  e momento magnético  $\vec{\mu}_J$ , se os átomos não interagem entre si, pode adotar a contribuição hamiltoniano, oriunda da interação com o campo magnético externo.

Quando ocorre o alinhamento dos momentos magnéticos com o campo aplicado, é possível obter o valor máximo de magnetização que se denomina magnetização saturada ( $M_S$ ). Por fim, os materiais diamagnéticos e os materiais paramagnéticos estão classificados no grupo não magnéticos por apresentarem magnetização apenas quando submetidos a um campo externo em ambos os tipos de materiais – a densidade do fluxo B em seu interior é equivalente à densidade do fluxo B no vácuo (HOLANDA *et al.*, 2019).

#### III. Ferromagnético

Os materiais ferromagnéticos independem da existência de um campo magnético externo para que exista um momento magnético, ou seja, momento magnético permanente. Esse fenômeno ocorre em metais de transição (Fe, Co, Ni) e Terras Raras (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm) e podem apresentar susceptibilidade magnética elevada.

Levando em consideração a interação spin  $\leftrightarrow$  spin como o responsável pela origem do campo interno ( $\vec{H}_{int} \approx 10^3 T$  (Fe)), também conhecido como campo molecular de Weiss, é possível analisar que o campo interno é maior que o campo criado por dipolo magnético ( $H_d \approx 10^{-1}T$ ). Portanto, de acordo com Holanda *et al.* (2019) os materiais ferromagnéticos vão, consequentemente, ter suas interações entre dipolos magnéticos de origem não magnética, que pode ser comprovado pela mecânica quântica, baseado na teoria de Pauli (Princípio de Exclusão). Devido ao acoplamento de interações do material ferromagnético, faz com que os momentos magnéticos de spin resultantes de átomo adjacentes se alinhem uns com os outros, sem a necessidade do  $\vec{H}$ , conforme a Figura 12.

Figura 12 – Alinhamento mútuo de dipolos atômicos para um material ferromagnético em ausência de  $\vec{H}$ 



Fonte: Adaptado de Callister Jr. (2006) apud Rocha (2018).

Quando aplicado um campo externo  $\vec{H}$  a um material ferromagnético, o campo efetivo sentido vai ser a soma do campo externo mais o campo interno.

IV. Antiferromagnetismo

O material antiferromagnético é composto por duas sub-redes ordenadas ferromagneticamente de spin e opostas entre si que resulta em uma magnetização nula em relação à temperatura (0K). A Figura 13 representa as duas sub-redes (I e II) e os spins ferromagneticamente opostos, resultando em uma magnetização nula quando submetido ao zero absoluto.



Figura 13 – Ordenamento antiferromagnético

Fonte: Adaptado de Padilha (1997).

O óxido de manganês (MnO) é um exemplo de um material antiferromagnético. O óxido é um material cerâmico de origem iônica que possui íons  $Mn^{2+}$  e  $O^{2-}$ . Os íons  $Mn^{2+}$  possuem momentos magnéticos resultantes que se originam do spin e os íons de  $O^{2-}$  não apresentam momentos magnéticos uma vez que existe o cancelamento do momento de spin e do orbital. A estrutura cristalina compõe o arranjo dos íons  $Mn^{2+}$  de tal forma que os momentos de íons adjacentes sejam antiparalelos (Figura 14), o que implica no cancelamento entre eles, gerando um material com momento magnético resultante nulo.

Figura 14 – Alinhamento antiparalelo de momentos magnéticos de spin para o óxido de manganês antiferromagnético



Fonte: Callister Jr. (2020).

### V. Ferrimagnetismo

Os materiais ferrimagnéticos também possuem dois tipos diferentes de íons magnéticos que se orientam de forma não paralela, ou seja, alguns materiais cerâmicos também exibem uma magnetização permanente e, mesmo coexistindo dois tipos de íons com momentos magnéticos diferentes, eles não se anulam (ROSENTAL, 1971).

As características magnéticas macroscópicas dos ferromagnetos e dos ferrimagnetos são semelhantes; a distinção está na fonte de seus momentos magnéticos resultantes. O princípio do ferrimagnetismo é ilustrado pelas ferritas cúbicas. Esses materiais iônicos possuem fórmula química MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, na qual M representa qualquer um entre vários elementos metálicos. A ferrita protótipo é o Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (magnetita) vulgo pedra-ímã (*lodestone*).

Existe uma semelhança entre a natureza antiferromagnético e a natureza ferrimagnético em que ocorrem as interações de acoplamento de spins, porém o momento ferrimagnético tem origem no cancelamento incompleto dos momentos de spin (ALCARÁS, 2015).

### 3.1.8 Influência da temperatura no comportamento magnético

A temperatura pode influenciar de forma significativa no comportamento magnético de alguns materiais. Quando um sólido é exposto a certa temperatura, as vibrações térmicas dos átomos começam a surgir e, com isso, ocasiona a aleatoriedade nos momentos, perdendo o alinhamento.

O fenômeno ocorre para os materiais ferromagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos. Desse modo, a força de movimento térmico dos átomos atua contra as forças de acoplamento entre os momentos dos dipolos atômicos adjacentes, provocando o desalinhamento do dipolo, independentemente da existência ou não de um campo externo (CALLISTER JR., 2020).

Portanto, esse fenômeno de vibrações térmicas dos átomos é conhecido como temperatura de Curie, o que resulta em uma diminuição de saturação com a elevação da temperatura e uma saturação máxima quando o material é apresentado à temperatura 0 K (vibrações térmicas são mínimas), conforme se observa na Figura 15.



Figura 15 – Gráfico da magnetização de saturação em função da temperatura para o ferro e o  $$\rm Fe_3O_4$$ 

Fonte: Adaptado de Smit e Wijn (1959).

### 3.1.9 Domínios magnéticos

O domínio magnético é a menor porção do material com uma única orientação magnética, ou seja, um material magnético pode ser considerado um aglomerado coeso de domínios magnéticos cujas fronteiras podem mudar (SILVA, 2012).

Todos os materiais ferrimagnéticos e ferromagnéticos que apresentados a uma temperatura menor que Tc vão apresentar um alinhamento mútuo de todos os momentos de dipolo magnéticos em uma mesma direção. A Figura 16 ilustra a região chamada domínio, na qual cada domínio está magnetizado até sua saturação.





Fonte: Callister Jr. (2020).

A contribuição de cada domínio para a magnitude do campo é encontrada de forma ponderada baseado na soma vetorial de magnetização e sua fração volumétrica. Caso o material esteja inicialmente magnetizado, a densidade de fluxo vai variar de acordo com a intensidade de campo, para materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos, conforme a Figura 17. Portanto, B é diretamente proporcional a H, com isso, a inclinação da curva é a permeabilidade magnética, dada pela Equação 2.





Fonte: Adaptado de Callister Jr. (2006) apud Rocha (2018).
### 3.1.10 Histerese

A histerese é um fenômeno presente em alguns tipos de materiais e o ciclo ocorre quando um sólido é apresentado a um campo crescente em relação ao tempo até atingir a saturação do material. Com isso, ao inverter a direção do campo, o spin estará sujeito a um torque que o tenderá a inverter sua direção. Porém, as paredes de domínio aplicam forças coercivas, dificultando a inversão, portanto o campo quando nulo não implica necessariamente uma magnetização nula (PINHO, 2009).

Ao analisar a Figura 18, partindo do ponto de saturação (S), é possível observar a inversão da direção do campo com o decréscimo do campo externo (H). Com isso, é notório que a curva de saturação não regressa pela mesma trajetória inicial, ou seja, o campo B se defasa em relação ao campo H aplicado, produzindo o fenômeno da histerese.

O campo externo nulo (R) coexiste com um campo residual (B) denominado como remanência (B<sub>r</sub>), desse modo, o sólido permanece magnetizado mesmo na ausência de um campo externo.

Quando B no interior do sólido é nulo (C), significa que um campo externo com magnitude - $H_c$  deve ser aplicado em uma direção contrária à do campo inicial. Tem-se, então, o efeito coercividade e o ciclo se fecha até o campo oposto atingir a saturação (S').

Figura 18 – Ciclo de Histerese: Densidade de fluxo magnético (B) versus campo magnético incidente (H) para um material ferromagnético



Fonte: Adaptado de Callister Jr. (2006) apud Rocha (2018).

A área interna do ciclo de histerese representa a perda de energia magnética por unidade de volume do material por ciclo e essa energia se esvai em forma de calor, elevando a temperatura do material. Além disso, a área interna do ciclo pode ser interpretada conforme a Figura 19, de tal modo que os materiais magneticamente moles apresentam uma elevada permeabilidade inicial e uma baixa coercividade. Dessa maneira, esses materiais podem atingir sua saturação com baixo campo e com pequenas perdas de energia por histerese (PINHO, 2009).

Para materiais magneticamente duros, é esperada baixa permeabilidade inicial, com grandes perdas de energia, mas, em contrapartida, esses materiais apresentam elevado valor de coercividade, remanência e densidade de fluxo de saturação. Os materiais magnéticos duros são ideias para a produção de ímãs permanentes devido às suas características, alta resistência a desmagnetização (FRANCO, 2009).





Fonte: De Ralls; Courtney; Wulff (1976) apud Callister Jr (2020).

### 3.1.11 Magnetismo dos materiais

As propriedades magnéticas são fenômenos que têm sua origem na mecânica quântica. O movimento dos elétrons carregados se caracteriza como uma corrente elétrica, que gera um momento magnético intrínseco a esse movimento conhecido como momento de dipolo magnético  $\vec{\mu}_L$  (HOLANDO *et al.* 2019).

Baseado na lei de Ampère-Maxwell, é possível chegar na Equação9, onde  $\vec{B}$  é o campo magnético,  $\vec{J}$  é a densidade da corrente elétrica,  $\mu_0$  é a constante de permeabilidade magnética e  $\in_0$  é a permissividade elétrica do vácuo e  $\vec{E}$  a variável do tempo.

$$\nabla x \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \in_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$
<sup>(9)</sup>

O momento angular eletrônico é vinculado a dois fatores, sendo a contribuição orbital semelhante a uma única espira de elétron orbitando um núcleo atômico e a do spin. Dessa forma, ao somar as duas contribuições, é possível encontrar o momento angular total  $\vec{J}$ .

A teoria eletromagnética clássica aborda que, ao aplicar um campo magnético  $\vec{H}$  em um material com momento magnético  $\vec{\mu}$ , vai implicar no surgimento de um torque devido à existência do campo dado pela Equação 10.

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} x \vec{H} = \frac{d\vec{J}}{dt}$$
(10)

Ao interpretar a equação 10, é possível identificar um possível alinhamento ao campo aplicado que implica diretamente na taxa de variação temporal de  $\vec{\mu}$ .

### 3.2 Principais minerais de ferro

Entre todos os minerais de ferro, a magnetita, a hematita, a goethita e a limonita são as mineiras mais comuns, principalmente no quadrilátero ferrífero.

## 3.2.1 Magnetita

De acordo com Silva (2012), a magnetita é o principal mineral magnético e sua cristalização influencia diretamente em seu comportamento magnético. O mineral puro apresenta uma densidade de 5,2 t/m<sup>3</sup> e seu tamanho crítico é de 0,05µm (domínio).

A magnetita normalmente está associada às rochas metamórficas cristalinas e às rochas ferromagnesianos. Em relação a suas propriedades físicas, tem brilho metálico, cor preta e

traço preto e sua composição é  $\alpha - F_{e3}O_4$  ou  $F_eF_{e2}O_4$  com 72,36% de Fe e 27,64% de O (SILVA, 2012).

### 3.2.2 Hematita

A hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) é um oxido que apresenta cor preta, cinza metálico ou vermelho sangue, brilho metálico, hábito romboédrico, tabular, granular, laminar, botrioidal, compacto ou terroso, com dureza 5,5-6,5, e densidade relativa entre 4,9 e 5,3 g/cm<sup>3</sup>. Sua principal característica é o seu traço avermelhado (observado ao riscar uma placa de porcelana). Sob condições de fugacidade de oxigênio crescente, a magnetita pode ser transformar em hematita que preserva seu habito original, ou seja, pseudomorfos conhecida como hematita martítica (CAXITO, 2018).

Seu tamanho crítico (domínio) é da ordem de 200 a 300 µm e, por ser um mineral fortemente anisotrópico, implica que seus cristais podem ser magnetizados por campos aplicados ao longo do plano basal, contudo os cristais não sofrem ação do campo quando aplicados perpendicularmente a esse plano, salvo quando o campo aplicado é extremamente elevado (TARLING, 1993).

### 3.2.3 Goethita

A goethita é uma mineral do sistema ortorrômbico, classe bipiramidal, com cristais de forma acicular, maciça, reniforme, estalactítica, em agregados fibrosos radias. Tem como característica a clivagem perfeita, apresenta dureza entre 5 e 5,5, densidade 4,3 e brilho adamantino a opaco, podendo ser sedoso em algumas variedades finamente escamosas ou fibrosas. A goethita além da fórmula FeOOH, pode conter quantidade variáveis de água adsorvida, bem como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, BaO, SiO<sub>2</sub> (ROCHA, 1997).

A goethita é um mineral com traço amarelo e antiferromagnético e tem a magnetização e coercividade superior à hematita e quando exposta a desidratação, resulta em hematita ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que é levemente paramagnética.

O mineral em questão, ocorre devido ao intemperismo de mineiras de ferro, como siderita, magnetita, pirita e outros. Sua composição contém 62,9% de ferro, 27% de oxigênio, 10,1%

de água e uma quantidade de manganês relativamente alta (superior a 5%). Como produto de intemperismo de minerais de ferro, a goethita é a responsável pela formação do gossan, popularmente chamado de "chapéu de ferro". Ocorre sobre os filões metalíferos e dão origem aos mantos *lateríticos resíduas* (SILVA, 2012).

### 3.2.4 Limonita

Descrita como amorfa, ou seja, sem estrutura cristalina ordenada, apresenta sob a forma de massas mamilares e estalactícias, concrecionar, nodular, terrosa e ocasionalmente vítreas, com dureza entre 4 a 5,5 e densidade variando entre 2,7 e 4,3 t/m<sup>3</sup>, cor amarelada, amarronzada, marrom alaranjada e seu traço amarelo a marrom avermelhado (ROCHA, 1997).

Silva (2012), aborda que a fórmula da limonita é considerada definida ( $2Fe_2O_3.3H_2O$ ), mas a limonita se constitui basicamente de goethita criptocristalina, contendo água adsorvida e a presença de alguma hematita, ou seja, o nome limonita não é aceito para denominar um mineral.

A limonita é um produto de alteração de minerais de ferro e pode ser encontrada em diversos tipos de rochas. É característico sua ocorrência em chapéu de ferro associado com hematita e minérios de manganês.

### 3.3 Gaustec tecnologia magnética

A Gaustec Tecnologia Magnética, empresa brasileira com sede na cidade de Nova Lima – MG, é uma empresa com experiência na fabricação de separadores magnéticos de alta intensidade (WHIMS) e na elaboração de novas tecnologia para o ramo mineral. Atualmente, a empresa atende a mais de 43 empresas, com 111 equipamentos vendidos, e está presente em 9 países.

A Gaustec é responsável pela fabricação do maior e do menor separador magnético do mundo e responsável pela nova tecnologia de matrizes, capazes de apresentar ganhos em área de até sete vezes comparados com as matrizes comuns, além da alta performance de campo e gradiente.

### 3.3.1 Separadores magnéticos da Gaustec

De acordo com Rocha (2018), os separadores magnéticos do tipo carrossel são os mais utilizados atualmente. Esses equipamentos podem conter entre 2 e 3 rotores posicionados no mesmo eixo. Os separadores magnéticos patenteados pela Gaustec são os modelos tetrapolares e hexapolares (2 rotores), tecnologia capaz de permite o aumento na taxa horária de alimentação da usina, garantindo melhor eficiência do gasto energético das bobinas.

A principal diferença entre os modelos tetrapolar e hexapolar está relacionada ao arranjo das bobinas e dos polos magnéticos (Figura 20), que permite alcançar uma taxa de alimentação superior aos modelos convencionas (bipolar). A Figura 20 (A) apresenta vista superior do modelo tetrapolar, com 8 pontos de alimentações, sendo 4 no rotor inferior e 4 no rotor superior. A Figura 20 (B) está apresentando em vista vertical o modelo hexapolar, com 12 pontos de alimentações, sendo 6 no rotor inferior e 6 no rotor superior.

Figura 20 – Separadores magnéticos do tipo carrossel com vista vertical - (A) modelo tetrapolar (B) modelo hexapolar



Fonte: Adaptado de Ribeiro e Ribeiro (2013).

O separador magnético do tipo carrossel apresenta rotação em seu próprio eixo, sendo que a polpa alimenta as caixas de distribuição que, por sua vez, alimentam as matrizes. As partículas magnéticas se aprisionam nas paredes das matrizes devido à presença do campo enquanto as partículas não magnéticas não sofrem ação do campo e são descarregadas por gravidade para a bandeja de rejeito. A lavagem no médio tem como função limpar as partículas não magnéticas que foram arrastadas ou retirar as partículas mistas e, por fim, na

zona "neutra", o concentrado é descarregado com água em alta pressão com auxílio dos bicos de lavagem.

### 3.3.2 Matriz comum (8r) e Super BigFLUX®

Um dos principais elementos que compõem o separador magnético são as matrizes (Figura 21). As matrizes são formadas por placas ranhuradas de aço inoxidável que apresentam maior permeabilidade e podem ser inteiriças (255x297x220) ou bipartidas (170x297x220 – 85x297x220) ou tripartidas (85x297x220) devido ao seu elevado peso unitário (ergonomia).



Figura 21 - Matriz magnética

Fonte: Vale (2015).

A distância vertical entre os pontos agudos de uma placa ranhurada é denominado GAP (vão) e a distância horizontal entre os dentes é denominado *Pitch* (passo) (Figura22).

Figura 22 – Dimensões básica das matrizes



Fonte: Gaustec (2021).

As matrizes dentadas apresentam uma série de vantagens em relação aos outros meios de concentração magnéticas (esfera de aço, esponja de aço, chapas expandidas). De acordo com Pancrácio (2021), as matrizes permitem o livre escoamento da polpa por seus canais, sem obstáculos.

Em 1991, as primeiras matrizes dentadas para os separadores magnéticos do tipo Jones foram produzidas com um distanciamento entre os dentes (*pitch*) igual a 3,175 mm (8 R – oito dentes por polegada), conhecida como matriz comum. Além dessas, foram lançadas as matrizes com *pitch* igual a 2,2 mm (12 R – doze dentes por polegada) e outra com *pitch* igual a 6,35 mm (4 R – quatro dentes por polegada), com o intuito estabelecer um critério para a concentração do minério de acordo com o tamanho de partículas. Assim, para o processamento de partículas maiores utilizam-se matrizes com menor quantidade de dentes (dentes maiores) e para o processamento de partículas menores utilizam-se matrizes com matrizes com matrizes com matrizes com menor quantidade de dentes (dentes menores).

Devido à necessidade de beneficiar minérios cada vez mais pobres, mais finos e complexos, em 2021 a Gaustec, com apoio da NewGAPS, lançou a nova matriz Super BigFLUX<sup>®</sup>, com um *pitch* igual a 5,5 mm. Com isso, foi constatado que, para partículas finas e ultrafinas, é necessário o aumento dos dentes, ou seja, menos dentes por polegada, o que torna os tamanhos dos dentes uma nova variável de processo na concentração magnética.

De acordo com a premissa que placas, ranhuradas com dentes pequenos promovem melhor a concentração do minério magnético. No entanto, nota-se que a afirmação é falsa, pois, ao diminuir o tamanho dos dentes, consequentemente é reduzido o valor de gradiente, que é um fator multiplicador na equação de força de atração. A premissa verdadeira é baseada no aumento do gradiente, onde é possível aumentar a força de atração e, assim, vencer a força de arraste hidrodinâmico nas partículas em polpa e "capturá-las" nas paredes das matrizes, ou seja, dentes maiores para concentrar partículas menores.

Quando se busca um alto campo magnético utilizando matrizes nos separadores do tipo carrossel, a opção é buscar matrizes com GAPs menores. Porém, as matrizes comuns apresentam uma grande dificuldade ao diminuir os GAPs, devido ao entupimento resultante a pequena área livre, prejudicando a passagem do fluxo de polpa. Dessa maneira, matrizes comuns com GAPs inferiores a 1.5 mm são tecnicamente inviáveis no setor industrial.

Ao utilizar a matriz Super BigFLUX<sup>®</sup>, ocorre o aumento da área de passagem e permite o uso de GAPs menores, sem a ocorrência do entupimento por granulometria. Por conta das dimensões dos dentes maiores, gerando um ganho de área três vezes maior que a área de uma matriz comum de mesmo GAP.

As matrizes com dentes maiores conseguem apresentar campos superiores, comparados ao mesmo GAP de matrizes com dentes menores. Esse efeito acontece devido ao cálculo eletromagnético ilustrado na Figura 23, na qual a Figura 23-A (matriz comum) e a 23-B (matriz Super BigFLUX) estão sob influência de mesma força magnética com mesma abertura entre os dentes (GAP). Pode-se afirmar que a condição aplicada promove a mesma quantidade de linhas de força em ambas as matrizes, mas, devido ao maior número de dentes na matriz comum (23-A), tende-se a diluir a densidade das linhas de força contrário a matriz Super BigFLUX (23-B), onde apresenta maior densidade das linhas que passam pelos dentes maiores.



Figura 23 - (A) - Matriz comum (B) - Matriz SuperBigFLUX (Pancrácio)

Fonte: Gaustec (2021).

Partindo desse conceito, é possível entender o principal agente causador desse fenômeno, o gradiente magnético. Dessa maneira, quanto maior a diferença do campo máximo (ponta dos dentes) do campo mínimo (base dos dentes) e do *pitch*, maior o gradiente e, consequentemente, maior a força magnética e melhor a eficiência da matriz conforme a Equação 11.

$$F = k.m.R^3.X_m.B_{max}.Grad.\frac{\Delta B}{\Delta X}$$
(11)

Onde:

F: Força de atração k: Constante de proporcionalidade m: Massa da partícula R<sup>3</sup>: Raio da partícula  $X_m$ : Susceptibilidade magnética da partícula  $B_{max}$ : Densidade máxima do campo magnético (Gauss)  $Grad. \frac{\Delta B}{\Delta x}$ : Gradiente (aproximado) do campo magnético (Gauss/mm)

Separando a Equação 11 em duas partes, A (característica da partícula) e B (característica da matriz ou meio magnético), tem-se as Equações 12 e 13.

$$A = k.m.R^3 X_m \tag{12}$$

$$B = B_{max}. Grad. \frac{\Delta B}{\Delta X}$$
(13)

Dessa forma, a Equação 12 depende diretamente das propriedades das partículas, ou seja, para partículas ultrafinas, tem-se o raio e a massa com valores depressíveis, tendendo a zero. Portanto, necessita-se um valor elevado para a Equação 13, podendo ser alcançado de forma mais fácil e barata, elevando o gradiente ( $Grad.\frac{\Delta B}{\Delta X}$ ). O campo magnético é de suma importância também para o ganho na força de atração e depende da corrente gerada pelas bobinas para o alto campo, mas as matrizes com dentes maiores proporcionam melhor eficiência para a passagem das linhas magnéticas, o que implica em um campo maior, comparado a outra matriz comum de mesmo GAP, com mesma corrente aplicada.

### 3.4 Aplicação da concentração magnética de alta intensidade (WHIMS)

De acordo com Rocha (2018), atualmente, faz-se necessário um melhor aproveitamento dos rejeitos até então descartados. Nesse sentido, o aperfeiçoamento dos processos de

concentração é necessário e para isso a pesquisa e o desenvolvimento se fazem obrigatório nas empresas mineradoras.

Sousa (2018) apresentou a importância da separação magnética na remoção de contaminantes ferrosos em diversos sistemas de processamento mineral, como no beneficiamento de caulim, cassiterita, scheelita, areia quartzosa, feldspato, amianto, minerais fosfáticos, talco, wolframita, minerais não sulfetados de molibdênio, urânio e na purificação de água, retirando as impurezas magnéticas, que em alguns casos podem ser cancerígenas, como também certos vírus e/ou bactérias que podem associar-se ao material magnético.

Segundo Ribeiro *et al.* (2017), a primeira exigência para se concentrar materiais finos é a utilização de campos magnéticos superiores a 18.000 Gauss e, por consequência, matrizes com GAPs menores de 1,5mm. Para recuperar os finos do rejeito (20 % Fe) da planta de flotação da Vale – Vargem Grande, foi instalado um separador magnético de alta intensidade, alimentado com 80m<sup>3</sup>/h de polpa, com 40% de sólidos e por um período de 3 meses. Foram coletas diariamente 22 amostras. Com isso, foi possível analisar a qualidade média do produto gerado, que apresentou 62% de Fe, com recuperação mássica de 14%, com uma produção anual superior a 1 milhão de tonelada.

Utilizando o rejeito das espirais de Humphreys com menos de 20% de Fe e com granulometria menor que 0,15mm, José *et al.* (2016), por meio de separação magnética de alta intensidade, alcançou, com apenas uma etapa de concentração, um teor médio de 61,5% Fe e um rejeito inferior a 4% de Fe.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico estão apresentados os procedimentos realizados para alcançar os objetivos desta pesquisa. A parte experimental foi realizada no Centro de Pesquisa *Gaustec Magnetic Technology*, nos Laboratórios de Tratamento de Minério do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, e as análises químicas no laboratório da Itaminas Comércio de Minérios S/A.

### 4.1 Amostragem e preparação das amostras

O presente estudo foi realizado utilizando uma amostra do rejeito da usina de beneficiamento de minério de ferro da Itaminas Comércio de Minérios S/A, localizada na cidade de Sarzedo – MG.

A Figura 24 apresenta o fluxograma simplificado do circuito de beneficiamento da ITM-08, em que as linhas verdes representam os fluxos de concentrados, as linhas vermelhas, os fluxos de rejeitos, e as linhas pretas, os fluxos de alimentações.

O processo da Itaminas conta com 2 tambores magnéticos (WDRE) no processo do escalpe magnético da alimentação, e o rejeito do tambor contribui no reempolpamento do ROM da linha C (alimentação II), que tem como separador principal o Ghp-400 (3,8 mm BigFLUX<sup>®</sup>) na etapa *rougher*. A linha A e B conta com o Gx-3600 (3,8 mm BigFLUX<sup>®</sup>) para a realização da etapa *rougher* onde o G-3600 (2,5 mm Super BigFLUX<sup>®</sup>) realiza a etapa *cleaner* e o Ghp-150 (2,5 mm Super BigFLUX<sup>®</sup>) a etapa *scavenger*. A etapa *scavenger* conta com uma etapa *cleaner* no G-3200 (2,5 mm Super BigFLUX<sup>®</sup>) e o rejeito do Ghp-150 alimenta a linha D e posteriormente a linha E que são dois equipamentos hexapolar Ghx-1400 que fazem de maneira similar as etapas *scavenger* (1,5 mm Super BigFLUX e 1,1 mm Super BigFLUX<sup>®</sup>), *cleaner* (2,5mm BigFLUX<sup>®</sup>) e *recleaner* (2,5mm STD BigFLUX<sup>®</sup>) do rejeito oriundo do Ghp-150.



Figura 24 - Fluxograma simplificado - Itaminas Comércio de Minério S/A

Fonte: Autoria própria (2022).

A coleta do material utilizada neste trabalho foi realizada na última etapa do processo, no ponto denominado como rejeito final. A Figura 25 apresenta com detalhe essa etapa. É possível observar os dois tanques de amostragem demarcados com um círculo vermelho. A polpa que verte do *overflow* do hidrociclone, com densidade média de polpa de 1,08 t/m<sup>3</sup>, porcentagem de sólidos variando entre 10 e 13% e classificado em -0,038 mm para o tanque, coletada para realização dos testes.



Figura 25 - Fluxograma do rejeito final Itaminas

Fonte: Autoria própria.

As amostras foram coletadas durante cinco dias consecutivos, uma vez ao dia. Foram utilizados 2 tambores de 120 litros em cada linha, totalizando 4 tambores de polpa. No início de cada amostragem, foi necessário sifonar a água após decantar o material. A Figura 26 apresenta o processo de coleta de amostra.



Figura 26 - Coleta das amostras Itaminas

Fonte: Autoria própria.

O material em forma de polpa contido nos quatros tambores foi homogeneizado em um tanque com capacidade de 300 litros, contendo um agitador mecânico e uma bomba de fluxo de polpa conforme apresentado na Figura 27.



Figura 27 - Tanque de homogeneização de polpa

Fonte: Autoria própria (2022).

Após vinte minutos de agitação mecânica, foram retirados 20 litros de polpa para caracterização física e química do material e o restante da amostra foi utilizada para a realização dos testes de separação magnética.

Esse material foi seco em uma chapa com temperatura média de 100 °C, homogeneizado e quarteado conforme a Figura 28, gerando alíquotas com massa suficiente para os ensaios de caracterização. As alíquotas A, foram destinadas para a análise granulométrica global, a alíquota B foi destinada para a análise granulométrica menor que 0,15 mm, a alíquota C foi destinada para o teste de picnometria, a alíquota D foi destinada para realização da química global e as alíquotas E foram arquivadas.



Figura 28 - Fluxograma do planejamento das alíquotas

Fonte: Autoria própria.

## 4.2 Análise granulométrica

Para conhecer a distribuição granulométrica do material foi realizado o peneiramento com a série de peneiras apresentadas na Tabela 4. O experimento foi realizado em via úmida e em

duplicata. Foi feito um corte em 0,15 mm com o intuito de gerar massa para a análise química tanto do passante quanto do material retido.

Peneiramento # 12 16 28 32 48 65 100 150 200 325 400 -400 (mm) 1,4 1 0,6 0,5 0,3 0,212 0,15 0,106 0,075 0,045 0,038 -0,038

Tabela 4 – Série de peneiras utilizadas na análise granulométrica do material

### 4.3 Análise química e mineralógica

As análises químicas foram realizadas no laboratório da Itaminas Comércio de Minério S/A, localizada em Sarzedo/MG, via fluorescência de Raios-X (FRX), analisando os elementos Fe, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P, Mn e PPC. O equipamento utilizado foi um espectrômetro Axios 44 FAST Espectometer, fabricado pela PANanalytical.

A análise mineralógica foi realizada no laboratório de Processamento & Caracterização Mineral Ltda (PCM), localizado em Antônio Pereira distrito de Ouro Preto (MG), via microscópio metalográfico de luz refletida - seção polida.

# 4.4 Ensaios de concentração magnética – Ímã de mão e concentrador magnético Minimag® Gaustec

Com auxílio de um ímã de mão de 4000 Gauss e uma porção seca representativa do material a ser trabalhado, foram realizados alguns testes com o objetivo de verificar a susceptibilidade magnética do material. Com isso, foi possível identificar de maneira empírica, se ocorreria algum transbordo por magnetismo do material, de acordo com a quantidade de material atraído pelo ímã de mão.

Os ensaios de concentração magnética em escala piloto foram realizados utilizando o equipamento Minimag<sup>®</sup>, apresentado na Figura 29. A alimentação foi feita no bocal do equipamento, simulando o modelo tetrapolar industrial. Os experimentos foram divididos em duas etapas: *rougher* e *cleaner*.

Fonte. Elaboração própria.



Figura 29 - Concentrador magnético Minimag® Gaustec

Fonte: Autoria própria.

## 4.4.1 Preparação dos ensaios de separação magnética – Etapa rougher

Para a realização dos ensaios de separação magnética no Minimag<sup>®</sup>, a polpa foi homogeneizada conforme descrito no item 4.1. Após a homogeneização realizou-se o corte granulométrico em 0,15 mm utilizando uma peneira quadrada (50x50x10cm). O undersize foi utilizado para a preparação da polpa.

Após o peneiramento a úmido, o material ficou em repouso para que as partículas mais finas pudessem sedimentar e desta maneira, realizar o desaguamento do material. A polpa foi feita em um tanque agitador com capacidade de 100 L. Conforme a necessidade de adequação da densidade da polpa era adicionado água e com auxílio de uma proveta e uma balança era realizado a adequação da polpa.

O tanque contemplava uma bomba de polpa e um medido 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, com objetivo de frear a velocidade da polpa e logo após, alimentava o separador magnético.

Como primeiro estágio de concentração magnética, a etapa *rougher* tem como objetivo uma pré-concentração do minério de ferro. Os testes dessa etapa foram realizados conforme os parâmetros estabelecidos na Tabela 5, variando a pressão de água de médio, a vazão de alimentação de polpa e rotação do rotor.

Parâmetros	Rougher 1	<b>Rougher 2</b>	Rougher 3	Rougher 4	Rougher 5
GAP (mm)	0,5mm SBF	0,5mm SBF	0,5mm SBF	0,5mm SBF	0,5mm SBF
Campo (G)	22000	22000	22000	22000	22000
Corrente (A)	41	41	41	41	41
$H_2Oc(Kgf/cm^2)$	4	4	4	4	4
H <sub>2</sub> Om(Kgf/cm <sup>2</sup> )	2	2	2	2	4
% Sólidos	16,32	16,32	16,32	16,32	16,32
SG (t/m³)	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39
DP (t/m <sup>3</sup> )	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
Taxa de Sólidos (t/h)	0,07	0,07	0,18	0,18	0,07
Vazão H <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> /h)	0,360	0,360	0,950	0,950	0,360
Vazão de Polpa (m <sup>3</sup> /h)	0,380	0,380	1	1	0,380
Rotação (RPM)	4	5	4	5	3

Tabela 5 – Parâmetros dos testes da etapa rougher

Para cada teste realizado, foram retirados dois produtos denominados como: concentrado e rejeito. Cada produto foi filtrado e seco em uma chapa com temperatura média de 100 °C. Em seguida, o material foi homogeneizado e quarteado no quarteador do tipo Jones e enviado para a análise química.

Os resultados foram analisados em termos de recuperação mássica e metalúrgica, e o teste que apresentou melhor resultado foi refeito com o intuito de gerar massa para a etapa seguinte. Para este teste também foi realizado uma análise granulométrica dos três produtos gerados (concentrado, médio e rejeito).

### 4.4.2 Etapa cleaner

Para obtenção de um produto dentro das especificações pré-estabelecidas (62% Fe e 10% de SiO<sub>2</sub>), fez-se necessária mais uma etapa para alcançar o resultados esperados. O concentrado da etapa *rougher* com o melhor índice de recuperação teve seus parâmetros replicados para gerar massa de concentrado e assim, sendo possível preparar a polpa da etapa *cleaner*. Após

replicar os parâmetros e gerar a massa necessária ( $\pm$  60 kg) de concentrado, foi necessário desaguar o produto a fim de adensar o material.

Com isso, foi realizado a polpa no tanque agitador com capacidade de 100 L conforme realizado na etapa *rougher*, desta maneira, a etapa *cleaner* teve como parâmetro as variáveis: campo magnético (corrente), pressão de água de lavagem do médio e a densidade da polpa (porcentagem de sólidos), conforme apresentados na Tabela 6.

Parâmetros	Cleaner 1	Cleaner 2	Cleaner 3	Cleaner 4	Cleaner 5
GAP (mm)	0,5mm SBF®				
Campo (G)	24000	24000	12000	22000	12000
Corrente (A)	46	46	28	41	28
H <sub>2</sub> Oc(Kgf/cm <sup>2</sup> )	4	4	4	4	4
$H_2Om(Kgf/cm^2)$	0	2	0	0	0
% Sólidos	23,53	23,53	23,53	12,83	12,83
SG (t/m³)	3,43	3,43	3,43	3,43	3,43
DP (t/m <sup>3</sup> )	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1
Taxa de Sólidos (t/h)	0,110	0,110	0,110	0,050	0,050
Vazão H <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> /h)	0,350	0,350	0,350	0,360	0,360
Vazão de polpa (m <sup>3</sup> /h)	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380
Rotação (RPM)	4	4	4	4	4

Tabela 6 - Parâmetros dos testes cleaner

Para cada teste realizado, foram retirados dois produtos denominados como: concentrado e rejeito. Cada produto foi filtrado e seco em uma chapa com temperatura média de 100 °C. Em seguida, o material foi homogeneizado, separado no quarteador do tipo Jones e enviado para a análise química.

# 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, apresenta-se a análise e a discussão dos resultados obtidos na pesquisa.

## 5.1 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica da amostra global, oriunda da última etapa do rejeito final, está apresentada na Figura 30. De acordo com a configuração do ciclone, 100% das partículas do *overflow* deveriam ser inferiores a 37µm. Porém, analisando a curva obtida, observou-se que

o  $d_{80}$  foi igual a 66  $\mu$ m, representando uma ineficiência de corte em, aproximadamente, 42,26%.

Devido ao processo de filtragem, é necessário que 100% das partículas estejam abaixo de 600  $\mu$ m, pois granulometria superior a essa pode danificar o tecido filtrante. Cerca de 0,6% da massa apresentou granulometria acima de 600  $\mu$ m, o que pode ser responsável pelos danos nos tecidos do filtro prensa.



Figura 30 – Análise granulométrica amostra global do rejeito

Fonte: Autoria própria.

### 5.1.2 Análise química

Os resultados das análises químicas da amostra global e das amostras separadas por faixas granulométricas estão apresentados na Tabela 7. Foi possível observar o elevado teor de ferro no rejeito final, principalmente na fração maior que 600 µm. A massa retida na malha de 150 µm foi de, aproximadamente, 2%, granulometria que não deveria ir para o rejeito filtrado.

Atualmente, cerca de 292 t/h de rejeito alimenta o filtro, ou seja, 2% retido em 0,15 mm, significa 140 t/dia com teor a 47% de Fe (54.410 t/ano). Analisando o material retido em 0,6 mm, os valores chegam a 15.489 t/ano com qualidade superior a 54% de Fe.

Desse modo, a ineficiência no corte do ciclone pode acarretar prejuízos financeiros referentes à perda de ferro e a troca de tecidos filtrantes com maior frequência que o previsto.

		SiO <sub>2</sub>			Mn	PPC	
Amostras	Fe (%)	(%)	$Al_2O_3(\%)$	P (%)	(%)	(%)	
Amostra Global (Overflow do Ciclone)	35,91	39,07	3,01	0,12	0,35	4,83	
Amostra +0,6mm	54,27	13,98	1,60	0,08	0,46	5,79	
Amostra +0,15mm -0,6mm	46,57	27,78	1,55	0,06	0,22	3,32	
Amostra + 0,15mm	47,60	23,78	2,11	0,08	0,35	4,86	
Amostra - 0,15mm	34,88	39,98	3,01	0,12	0,35	5,39	
Fonte: Elaboração própria.							

Tabela 7 – Análise química da amostra global e análise granulométrica

A Figura 31 apresenta uma fotografia retirada da lupa binocular de diferentes frações granulométricas. Na imagem (A), referente à fração +0,6 mm, é possível observar a presença de partículas de ferro (pontos escuros), e na imagem B (+0,15mm), nota-se pouca presença de partículas de ferro.





Legenda: (A) Retido na malha +0,6 mm (B) Retido na malha +0,15 mm. Fonte: Autoria própria.

# 5.1.3 Análise mineralógica

O gráfico da Figura 32 apresenta uma análise mineralógica da amostra utilizada nesta pesquisa. Observou-se que cerca de 51,1% do rejeito é composto por minerais não portadores de Fe, e 48,9% apresentam Fe em sua composição.



Figura 32 – Análise mineralogia do rejeito final – Itaminas Comercio de Minérios S/A

Fonte: Adaptado de Itaminas Comércio de Minérios S/A (2021).

Analisando o gráfico, é possível recuperar, através da concentração magnética, os minerais como magnetita, hematita especular, hematita lamelar, hematita granular que apresentam 14% do rejeito. Devido às partículas finas e ultrafinas desses minerais, eles se encontram no rejeito da empresa. Isso por que as matrizes magnéticas com GAPs mais abertos são ineficientes para recuperação dessas partículas, uma vez que o arraste hidrodinâmico vence a força de campo magnético, ou seja, partículas finas e ultrafinas vão diretamente para o rejeito.

O gráfico mostrou que 18,1% da amostra de rejeito é composta por hematita martítica. Esse é um mineral que necessita de campo elevado para ser recuperado (> 7000 Gauss, de acordo com testes já realizados no Centro de Pesquisa da Gaustec). Além do alto valor de campo, é necessária a redução do GAP da matriz, caso contrário as martitas finas seguem para o rejeito, como foi observado nesta pesquisa.

Rocha (2018) explica que minerais hidratados portadores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, BaO e SiO<sub>2</sub> (responsáveis pelo aumento no PPC), como limonita e goethita (terrosa ou maciça), são fracamente paramagnéticos, sendo eles os grandes responsáveis pelo enriquecimento do rejeito na separação magnética. Nesse caso, apresentam grandes empecilhos para a concentração magnética.

Ainda sobre os dados, é possível observar que 77,48% do Fe no rejeito está contido nos minerais hidratados e martíticos, sendo apenas 22,52% do Fe do rejeito contido nos demais minerais portadores de ferro.

Considerando a análise mineralógica, é possível alcançar no máximo 18,27% de recuperação mássica e 36,69% de recuperação metalúrgica. Para isso, é necessário que não ocorra nenhuma contaminação de partículas mistas ou arrastadas, e não considerando as partículas de hematita martítica no concentrado.

# 5.2 Ensaios magnéticos

Neste tópico serão abordados os resultados encontrados nos ensaios de concentração magnética.

# 5.2.1 Ensaios com ímã de mão

A fração superior a 0,6 mm apresentou uma elevada atração pelo ímã de mão com campo magnético de 4000 Gauss, conforme pode ser observado pela Figura 33. Essa fração grosseira pode estar relacionada à ineficiência do processo, permitindo a perda de partículas que deveriam ser recuperados em etapas anteriores.



Figura 33 – Separação magnética com ímã de mão (fração +0,6 mm)

Fonte: Autoria própria.

A Figura 34 apresenta a separação da fração inferior a 0,15 mm com um ímã de mão. Foi possível observar que essa amostra apresentou susceptibilidade magnética relativamente elevada para um campo magnético de 4000 Gauss e elevado percentual de particulados mistos.



Figura 34 – Separação magnética com ímã de mão (fração +0,15 mm)

Fonte: Autoria própria.

Ao realizar o mesmo teste com a fração retida em 0,037 mm (Figura 35), notou-se a existência de material magnético possivelmente liberados, baseado nos gráos observados na lupa binoclucar após a separação com auxílio do ímã de mão. A Figura 35 (A) apresenta o material não magnético, e a Figura 35 (B), o material magnético capturado pelo ímã de mão de 4000 Gauss.



Figura 35 – Separação magnética com ímã de mão fração (+0,038 mm)

(A) - Rejeito (B) - Concentrado Fonte: Autoria própria. A Figura 36 mostra a imagem obtida da fração retido em 0,038 mm do rejeito na lupa binocular (aumento 2x), que indica uma possível liberação total da sílica e a chance de produzir areia, ou seja, um subproduto e, provavelmente, um rejeito zero.



Figura 36 – Imagem da fração retido em 0,038 mm em uma lupa binocular (aumento 2x)

Fonte: Autoria própria.

Portanto, a elevada quantidade de massa necessária para realizar o teste em escala piloto inviabilizou o teste com corte em 0,038 mm (deslamagem). Dessa forma, optou-se por realizar o corte em 0,15 mm, granulometria que torna possível a viabilidade desse teste em escala industrial.

### 5.2.2 Ensaios de concentração magnética - Etapa Rougher

A Figura 36 apresenta o material utilizado para realizar os ensaios, que apresentou teor de 34,87% Fe e 39,98% SiO<sub>2</sub>.

Com o intuito de minimizar o arraste de material não magnético para o concentrado, foi necessário diluir a polpa para 1,13 t/m<sup>3</sup> ( $\pm$ 16% de sólidos).



Figura 37 - Rejeito utilizado nos testes de separação magnética

Fonte: Autoria própria.

O gráfico da Figura 38 apresenta os resultados obtidos na etapa *rougher*, na qual variou-se a rotação, a vazão e a pressão de água de lavagem de médio, que são parâmetros operacionais da máquina industrial.



Figura 38 - Resultados dos testes de concentração magnéticas - etapa rougher

Fonte: Autoria própria.

Por se tratar de uma etapa *rougher* de um rejeito final, o foco foi a separação magnética e não a concentração magnética, ou seja, apenas separar o material de interesse (maior recuperação em massa) para, na etapa subsequente (*cleaner*), obter um produto final dentro das especificações de mercado.

Observou-se que o rejeito da etapa *rougher* continuou com alto teor de ferro, e, pela análise mineralógica, o mínimo de ferro que o rejeito pode apresentar é cerca de 27,02%, por causa da elevada quantidade de minerais ultrafinos hidratados e martíticos.

Outro ponto interessante foi a variação causada no teor e na recuperação em massa quando alterado à vazão de polpa, água de lavagem das partículas mistas e rotação do rotor. Na Figura 39, pode-se observar no teste (*rougher* 4) que o aumento na vazão de polpa significou um aumento de até 5% no teor e uma perda de até 30%, em relação ao *rougher* 3, na recuperação em massa. Isso acontece em decorrência do aumento na força hidrodinâmica, proporcionando uma força maior de arraste nas partículas pelo fluxo de água, vencendo a força de campo magnético sobre as partículas ultrafinas. Assim, ocorre o ganho na qualidade pelo fato de as partículas com elevada susceptibilidade magnética continuarem aprisionada nas matrizes.



Figura 39 – Influência da vazão de polpa, água de lavagem e rotação na qualidade e recuperação mássica dos produtos

### Fonte: Autoria própria.

A água de lavagem do médio é um dos principais fatores que interferem na eficiência da concentração magnética. Ao analisar o resultado do experimento *rougher* 5, realizado com o maior valor de pressão de água (4 kgf/cm<sup>2</sup>), menor rotação (300 rpm) e vazão de polpa igual a 0,380 m<sup>3</sup>/h, observou-se que o teor do concentrado foi elevado, porém a recuperação caiu comparado aos testes com mesma vazão (*rougher* 1 e *rougher* 2). Esse fato pode ser explicado pela pressão da água de médio lavar o material dentro das matrizes, proporcionando uma melhor seletividade e limpando as partículas mistas, o que implica em uma perda de massa no concentrado e um ganho na qualidade.

### 5.2.3 Ensaios de concentração magnética – Etapa Cleaner

Para alcançar a especificação de produto estabelecida pela Itaminas, que prevê um concentrado com 62% Fe e SiO<sub>2</sub> <10%, foi necessário realizar uma etapa *cleaner*. Para tanto, foram selecionados os parâmetros do teste *rougher* com a maior recuperação em massa para prosseguir com a etapa *cleaner*, nesse caso, optou-se pelo *rougher* 1.

A Figura 40 apresenta os resultados dos testes de concentração magnética da etapa *cleaner*. Analisando os resultados, foi possível observar que existe a viabilidade técnica de concentrar o rejeito da Itaminas. Porém, atualmente, não existe uma máquina que poderia implementar essa rota. Portanto, é necessária a aquisição de um novo separador magnético para implementar uma nova linha para recuperar o rejeito da ITM-08.

Atendendo às expectativa de 62% de Fe com < 10% de SiO<sub>2</sub> no produto final, um outro parâmetro importante a ser observado é a recuperação em massa. O teste *cleaner* 4 apresentou o maior valor de recuperação mássica (64,98%). Industrialmente, é possível alterar os parâmetros operacionais a fim de elevar a recuperação em massa, diluindo o teor de ferro do produto. De maneira operacional, pode ser alterada a velocidade de rotação (superior a 4 rpm), a pressão de água de lavagem (0 kgf/cm<sup>2</sup>), o adensamento da polpa (porcentagem de sólidos superior a 25).



Figura 40 – Resultados dos testes de concentração magnética da etapa *cleaner* 

Fonte: Autoria própria.

Os dados apresentados na Figura 41 correlacionam pressão de água de lavagem de médio, porcentagem de sólidos e campo magnético com o teor e a recuperação mássica. Foi possível observar a importância da pressão de água de lavagem na recuperação de partículas mistas. O maior teor de ferro no concentrado (64,67%) foi obtido no teste com vazão de água de lavagem de médio diferente de zero (*cleaner* 2), consequentemente, a recuperação em massa foi menor.

Em relação à porcentagem de sólidos, observou-se que a baixa quantidade de sólidos atuou de maneira a elevar a seletividade da separação dentro da matriz. Em contrapartida, ocorre uma perda de produtividade, que pode ser amenizada com um equipamento mais robusto, ou seja, de maior capacidade volumétrica.

A variação do campo magnético não foi uma variável que gerou diferenças significativas em relação à qualidade e à recuperação em massa. Isso pode ser explicado pela distância entre os "dentes" ser extremamente reduzida no GAP 0.5 mm da matriz Super BigFLUX, que aumenta a eficiência das linhas de campo, ou seja, reduz o gasto energético e melhora a recuperação em massa e matalúrgica. Observou-se, então, que os campos de 12.000 Gauss ou 24.000 Gauss geraram resultados semelhantes, ficando a escolha do campo a cargo da necessidade de

água de lavagem do médio. Ou seja, se, através de uma análise mineralógica e/ou granuloquímica for comprovada a existência de partículas mistas ou não magnéticas no concentrado, pode-se elevar o campo e aumentar a água de lavagem, minimizando, assim, a perda de minerais magnéticos para o rejeito.

O campo magnético elevado não apresentar um ganho em massa ou qualidade (teor de Fe) superior ao campo magnético de 12.000 Gauss, pode estar relacionado à não recuperação das hematitas martíticas e aos minerais hidratados. Sendo assim, faz-se necessário o estudo mineralógico dos produtos, para assim entender se o campo elevado arrasta, de fato, mais partículas hidratadas e martíticas do que o campo mais baixo. Além disso, um estudo desse aspecto possibilita entender se o elevado campo proporciona um arraste das partículas não desejadas, que ocasiona a diminuição da qualidade do concentrado em comparação com o menor campo.

Figura 41 – Gráfico comparativo – Água de lavagem de médio x sólidos x campo magnético x qualidade x recuperação mássica



Fonte: Autoria própria.

A Figura 42 apresenta os dados referentes à recuperação mássica global do estudo. Conforme a análise mineralógica do item 5.1.3, era prevista uma recuperação mássica inferior a 18,27%, já que a análise pressupôs a não "captura" dos minerais hidratados e martíticos.

Atingiu-se 65% de eficiência na recuperação de finos magnéticos baseado na análise mineralógica, levando em consideração a não captura das partículas hidratadas e martíticas. A maior razão de enriquecimento desde a alimentação na etapa *rougher* até o concentrado final foi igual a 85,46%. Dessa maneira, o estudo apresenta um possível ganho de até 705 t/dia (partindo da massa média gerada por dia de rejeito na Itaminas – 5830 t/dia rejeito filtrado), de concentrado com 63,41% de Fe e 5,26% de SiO2.



Figura 42 – Taxa de enriquecimento e recuperação mássica global

Fonte: Autoria própria.

O gráfico da Figura 43 esboça a divergência na recuperação mássica da etapa *rougher*, realizada através da massa gerada no separador magnético e pela recuperação mássica através da análise química. Devido à grande dificuldade em trabalhar com material fino (lama), ocorre perda de material, portanto, no processo de amostrar e/ou filtrar os produtos da concentração, pode haver perda de massa. Com isso, por causa das perdas, a recuperação de massa pela química não coincide com a recuperação em massa pesada. Na etapa *cleaner* não ocorre esse desvio porque a granulometria do material não apresenta lama, o que facilita o manuseio dos produtos.

Nota-se, então, que a recuperação global da concentração de rejeito tende a dobrar, e esse fato viabiliza o investimento de maneira a diminuir o tempo para cobrir o CAPEX inicial. Baseado

nessa perspectiva, é sugerido trabalhar com o valor menor da recuperação, buscando ser mais conservador e realista, mas a premissa não deixa de ser verdadeira.



Figura 43 – Gráfico comparativo entre recuperação em massa e recuperação mássica pela química e a recuperação metalúrgica

Fonte: Autoria própria.

A Figura 44 apresenta uma possível rota de processo para concentrar o rejeito final da Itaminas. Na proposta, o rejeito da Linha E é direcionado para o tanque de polpa (1), que alimenta o ciclone (2) que realiza o corte em 0,15 mm. O *underflow* é direcionado para um segundo tanque de carga circulante e o *overflow* alimenta outro ciclone (3) para o adensamento da polpa. O *overflow* (3) pode ser direcionado para o empolpamento do concentrado *rougher*, e o *underflow* alimenta o tanque de polpa (4), que bombeia o material para a primeira etapa *rougher* (5). O rejeito *rougher* é direcionado para o espessador (6), que adensa o material que alimenta o filtro prensa (9), e o concentrado (5) alimenta a etapa *cleaner* (7).

Desse modo, o rejeito *cleaner* retorna como carga circulante e contribui no reempolpamento da alimentação *rougher* e o concentrado *cleaner* é direcionado para a planta de desaguamento (8).



Figura 44 – Fluxograma simplificado (proposto para tratamento de rejeito)

Fonte: Autoria própria.

# 6. CONCLUSÕES

As análises dos resultados da etapa de caracterização confirmaram a ineficiência de corte do ciclone em 57,74%. O  $D_{80}$  ocorreu na faixa de 66 µm. Além disso, foi visto a existência de particulas maiores que 600 µm (0,6%), índice que prejudica os tecidos do filtro prensa.

As partículas +600 µm apresentaram uma qualidade relativamente alta de ferro (54%) e um elevado índice de magnetismo, e não deveriam chegar ao processo de corte do rejeito. Isso se deve a algum ponto de contaminação ou ineficiência de algum equipamento.

A análise mineralógica apontou que o rejeito final apresenta cerca de 51,1% de minerais não portadores do Fe, 34,9% de minerais hidratados e martíticos, restando apenas 14% de minerais magnéticos. Levando em consideração a não recuperação dos hidratados e martíticos, é possível alcançar, no máximo, 18,27% de recuperação em massa e um rejeito com 27% de Fe.

Os ensaios fundamentais apontaram que o rejeito é relativamente magnético, com isso, não existe a necessidade de campo elevado, salvo para buscar as partículas martíticas ultrafinas. Além disso, o material -0,038 mm se mostra 100% liberado e, devido à inviabilidade técnica em realizar o corte da massa em 0,038 mm, o estudo ocorreu no corte de 0,15 mm.

Na etapa *rougher*, foi possível alcançar uma razão de enriquecimento de até 65,44% no concentrado e uma recuperação em massa de até 18,63%. Outro ponto interpretado no estudo foi a melhora na qualidade ao aumentar a vazão, que é inversamente proporcional à recuperação em massa – também presente ao elevar a pressão de água de lavagem das partículas mistas.

Na etapa *cleaner*, o teste com água de lavagem de médio foi o que apresentou a melhor qualidade, porém, como esperado, a menor recuperação em massa. Outro ponto observado foi a menor porcentagem de sólidos, que efetivamente aumenta a seletividade e melhora até a recuperação mássica. Em contrapartida, a baixa porcentagem de sólidos diminui a produção diária devido à taxa de alimentação, o que pode ser resolvido com uma máquina de maior proporção volumétrica.

Devido ao GAP de 0.5 mm, nota-se a não necessidade de campo elevado para buscar as partículas magnéticas, pois distância reduzida entre os dentes aumenta a eficiência das linhas de campo, ou seja, reduz o gasto energético e melhora a recuperação em massa e metalúrgica. Porém, sabe-se que a tentativa de capturar partículas hidratadas e/ou martíticas ocorre com GAPs mais fechados e campo elevado.

Foi possível alcançar até 64,67% de Fe e 3,93% de SiO<sub>2</sub> no concentrado, chegando a uma recuperação global de até 12,11% e um rejeito com até 31,18% de Fe e 46,37% de SiO2. Dessa maneira, o rejeito ainda continua rico, comparado com a alimentação de 34,87% de Fe.

Portanto, a necessidade do GAP fechado é uma realidade quando o objetivo é melhorar a ineficiência em capturar os finos magnéticos da alimentação.

Ressalta-se que a continuação no estudo é de suma importância para entender o rejeito e verificar se é necessário um outro método de concentração para empobrecer o rejeito final da empresa Itaminas Comércio de Minérios.
## REFERÊNCIAS

ALCARÁS, J. R. **Mecânica Quântica Spin.** 2015. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2798057/mod\_resource/content/3/2015\_jose\_renato\_ spin.pdf. Acesso em: 20 nov. 2021.

Aula 11.86: Campo magnético em fio retilíneo londo e bobinas (webfisica.com)

CALLISTER JR., W. D. Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução. 10. ed. Grupo GEN, 2020.

CAXITO, F.; DIAS, T. G. **Ferro**. Disponível em: http://recursomineralmg.codemge.com.br/wp-content/uploads/2018/10/Ferro.pdf. Acesso em: 15 mar. 2022

FOGAÇA, J. R. V. Os quatro números quânticos. **Mundo educação**. Disponível em: https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/os-quatro-numeros-quanticos.htm. Acesso em: 22 nov. 2021

GUY, A. G. Introduction to Materials Science. EUA: McGraw-Hill Kogakusha Ltd., 1972.

HELERBROCK, R. Spin. **PrePara Enem**. 2015. Disponível em: https://www.preparaenem.com/fisica/spin.htm. Acesso em: 10 dez. 2021.

HOLANDA, L. M.; RAMOS, I. R. O.; LIMA, A. P.; BRAGA, J. P. M.; SOUZA, H. T. C. M. Comportamento magnético de materiais por meio da mecânica estatística. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, São Paulo 2020 Epub 02-Dez-2019. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbef/a/QcWw4dXtwxfnQNwJnWbpBnc/?format=pdf. Acesso em: 10 nov. 2021

JOSÉ, F. D. S.; 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, n. 14, p 296-301, 2016. Disponível em: https://descomplica.com.br/artigo/eletromagnetismo-introducao-formulas-e-aplicacoes/T4M/ Acesso em:

MUSSOI, F. L. R. **Fundamentos do Eletromagnetismo**. Versão 3.2. Centro Federal d Educação Tecnológica de Santa Catarina (CEFET-SC), Florianópolis, 2005. PADILHA, A. F. Materiais de Engenharia: microestrutura e propriedades. Curitiba: Hemus, 2000.

PINHO, L. C. A. B. de. **Materiais Magnéticos e suas Aplicações**. 2009. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica Computadores Major Energia) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2009. Disponível em: https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59887/1/000135917. Acesso em: 20 nov. 2021.

RIBEIRO, J. P.; RIBEIRO, C. H. T.; PINTO, P. F.; ROCHA, R. B. The Challenge to Scavenge IRON from Tailings Produced By FLOTATION A New Approach: The Super-WHIMS & the BigFLUX Magnetic Matrix. **REM, Int. Eng. J.**, v. 70 n. 3, Jul-Sep 2017. Disponível em:

https://www.scielo.br/j/remi/a/mpXgYYmmjKK5j859krZbNWn/abstract/?lang=en Acesso em: 23 out. 2021.

RIBEIRO, J. P.; RIBEIRO, C. H. T. New-mega-sized wet hight 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.

ROCHA, J. M. de Pinha. **Caracterização mineralógica de minérios goethíticos-limoníticos da mina de alegria, M.G**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1997.

ROCHA, R. B. da. **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.

ROSENTAL, D.; ASIMOV, R. M. Introduction to properties of materials. Nova York: Van Nostrnd Reinhold Company, 1971.

SANTOS, J. R. da Silva. **Modelo molecular para o magnetismo em ferro, cobalto e níquel**. 2009. Tese (Doutorado em Química Fundamental) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2009. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/9382/1/arquivo721\_1.pdf. Acesso em: 10 dez. 2021.

SERWAY, R. A.; JEWETT JR., J. W. *Física para Cientistas e Engenheiros*. 2. ed. Cengage Learning, Brasil, 2017. Volume 3.

SILVA, M. B. **Separação Magnética de Ultrafinos Hematíticos**. 2012. 232p. Dissertação (Mestrado em Tratamento de Minérios) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2012.

SMIT, J.; WIJN, H. P. J. **Ferrites**: physical properties and technical applications. Eindhoven (Holland): N.V. Philips Gloeilampenfabrieken, 1959.

SOUSA, T. S. de; POSSAPP, T. F.; NAZARENO, J. C.; SOUSA, D. N. de. Uso de separadores magnéticos no tratamento de minérios para a busca da manutenção e conservação do meio ambiente. **Cad. Ciênc. Agrá.**, v. 10, n. 1, p. 73–77, 2018. Disponível em: https://periodicos.ufmg.br/index.php/ccaufmg/article/view/3006/1829. Acesso em: 15 jan. 2022.

SVOBODA, J.; FUJITA, T. Recent developments in magnetic methods of material separation. **Minerals Engineering**, v. 16, 785–792, 2003.

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

TONIDANDEL, D. A. V.; ARAÚJO, A. E. A. de; BOAVENTURA, W. do C. História da Eletricidade e do Magnetismo: da Antiguidade à Idade Média. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 4, 2018. Disponível em:

https://www.scielo.br/j/rbef/a/fQ4Ck9MFSK5gHxKnQJy7T3x/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 16 dez. 2021.