



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



MATEUS FILIPE DE AZEVEDO

**AVALIAÇÃO DE ROTAS ALTERNATIVAS PARA CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIO
DE FERRO POR SEPARAÇÃO MAGNÉTICA**

Ouro Preto – 2025

MATEUS FILIPE DE AZEVEDO

**AVALIAÇÃO DE ROTAS ALTERNATIVAS PARA CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIO DE
FERRO POR SEPARAÇÃO MAGNÉTICA**

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

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Janine Rodrigues Figueiredo.

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A994a Azevedo, Mateus Filipe de.

Avaliação de rotas alternativas para concentração de minério de ferro por separação magnética. [manuscrito] / Mateus Filipe de Azevedo. - 2025.

51 f.: il.: color., gráf.. + Quadro.

Orientadora: Profa. Dra. Janine Rodrigues Figueiredo.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério - Deslamagem. 2. Minério de ferro. 3. Materiais - Separação magnética. I. Figueiredo, Janine Rodrigues. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.778

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Mateus Filipe de Azevedo

Avaliação de rotas alternativas para concentração de minério de ferro por separação magnética

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

Aprovada em 01 de abril de 2025

Membros da banca

Dr.^a Janine Rodrigues Figueiredo - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr.^a Francielle Câmara Nogueira - (Universidade Federal de Ouro Preto)
M. Sc. Kennedy da Silva Ramos - (Universidade Federal do Ceará)

Janine Rodrigues Figueiredo, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/04/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Janine Rodrigues Figueiredo, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/04/2025, às 19:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0897262** e o código CRC **8A1AFB39**.

Aos meus queridos pais, Regina Aparecida Soares
Pimenta e Júlio César de Azevedo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde e perseverança que me sustentaram durante toda essa trajetória.

Aos meus pais, Regina e Júlio, sou eternamente grato pela oportunidade de poder focar nos estudos. Vocês são meus balizadores de dedicação e esforço. Obrigado por me permitirem sonhar.

Aos meus avós, João e Eva, e Vicente e Maria Helena, vocês foram sinônimos de abrigo e são grandes responsáveis pela minha formação pessoal e acadêmica.

À minha irmã, Beatriz Viana, por toda amizade e afeto ao longo de nossas vidas.

À minha namorada, Laura Luiza, pelo apoio e suporte, não só nos momentos pessoais, mas também no âmbito acadêmico, ajudando-me a me tornar um ser humano melhor.

Aos meus amigos, com quem dividi grande parte da minha vida, em especial: Lucas Natividade, Leonardo da Costa, Samuel Reis, Pablo Victor, Ygor Reis, Maria Teresa, Victor Gabriel, Leonardo Pedrosa, Helbert Júnior, Vitória Nepomuceno e Lívia Faria.

À minha professora orientadora, Janine Rodrigues, por todo suporte durante esse processo.

À Gaustec, pela oportunidade de estágio, na qual pude me desenvolver profissionalmente.

À UFOP, à Escola de Minas, à Fundação Gorceix e ao DEMIN, bem como aos professores, por me proporcionarem não só uma graduação gratuita e de qualidade, mas também cursos extracurriculares que contribuíram para o meu crescimento.

À Minera Jr. e à Seminas, por tornarem essa trajetória ainda mais especial para mim.

Por último, a todos que contribuíram de alguma forma para a minha formação, o meu sincero agradecimento.

“Ser o que se pode é a felicidade. A felicidade é a aceitação do que se é e se pode ser.”

(Valter Hugo Mãe)

RESUMO

O minério de ferro é um recurso mineral estratégico, amplamente utilizado na produção de aço, essencial para setores como construção civil, transporte e infraestrutura. Com o esgotamento progressivo das reservas de alto teor, cresce a demanda por rotas de beneficiamento mais eficientes, especialmente para minérios com maior proporção de partículas finas. Nesse cenário, a separação magnética a úmida de alta intensidade (WHIMS) destaca-se como uma solução tecnológica para a recuperação de minerais fracamente magnéticos. Este trabalho avaliou o impacto da deslamagem na eficiência da concentração magnética, por meio de ensaios em escala piloto com um separador magnético de alta intensidade. Foram comparadas duas alternativas de rotas concentração de um minério de ferro: alimentação com deslamagem e alimentação sem deslamagem. Considerou-se diferentes variáveis operacionais, incluindo tipo de matriz magnética, intensidade do campo magnético e pressão da água. Posteriormente, realizou-se análise granulométrica dos concentrados obtidos nos ensaios. Os resultados indicaram que a alimentação sem deslamagem proporcionou teores de ferro entre 49,8% e 51,7%, recuperação mássica de 27,3% a 33,7% e recuperação metálica de até 60,9%, superando os valores obtidos na alimentação com deslamagem. Verificou-se que a utilização de uma alimentação com deslamagem, embora favoreça a seletividade, promove a remoção de partículas ultrafinas ricas em ferro, resultando em perdas metálicas e menores teores no concentrado. Conclui-se que a alimentação sem deslamagem, aliada a matrizes modernas como a *Super BigFLUX®*, representa a estratégia mais eficiente e economicamente vantajosa, ao maximizar o rendimento do processo e eliminar uma etapa, reduzindo custos operacionais.

Palavras-chave: Tratamento de Minério; minério de ferro, separação magnética, deslamagem, WHIMS.

ABSTRACT

Iron ore is a strategic raw material essential for steel production, which supports key sectors such as construction, transportation, and infrastructure. With the depletion of high-grade reserves, the beneficiation of lower-grade ores, particularly those with a high proportion of fine particles, has become increasingly important. Wet high-intensity magnetic separation (WHIMS) is a promising technique for recovering weakly magnetic minerals in this context. This study investigates the effect of desliming on magnetic separation efficiency using pilot-scale tests with a high-intensity magnetic separator. Two processing routes were evaluated: with and without desliming. Operational variables such as magnetic matrix type, field intensity, and wash water pressure were considered. Granulochemical analysis of the concentrates was performed. The non-deslimed feed yielded iron grades of 49,8 – 51,7%, mass recoveries of 27,3 – 33,7%, and metallic recovery up to 60,9%, outperforming the deslimed route. While desliming improves selectivity, it also removes ultrafine iron-rich particles, leading to lower iron recovery. The results suggest that using non-deslimed feed combined with advanced magnetic matrices such as Super BigFLUX® offers a more efficient and cost-effective strategy by maximizing recovery and simplifying the process.

Keywords: Mineral Processing; iron ore; magnetic separation; desliming; mass recovery; iron grade; WHIMS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma padrão de um Beneficiamento do Minério	16
Figura 2 - Momento magnético de um dipolo	18
Figura 3 - Materiais Magnéticos: Dipolos e Gráficos $M \times H$ - a) Diamagnéticos; b) Paramagnéticos; c) Ferromagnéticos; d) Antiferromagnéticos; e) Ferrimagnéticos	20
Figura 4 - Linhas de Indução do Campo Magnético	20
Figura 5 - Comparação entre os comportamentos de B em função de H para materiais ferromagnéticos/ferrimagnéticos e diamagnéticos/paramagnéticos	22
Figura 6 - Comparação entre a matriz Antiga e os modelos de matrizes BigFLUX® para o mesmo GAP.....	28
Figura 7 - Modelos das matrizes BigFLUX®	30
Figura 8 - Fluxograma simplificado da planta.....	32
Figura 9 - Minimag.....	34
Figura 10 - Quadro com os resultados dos testes com alimentação <i>Scavenger</i> com deslamagem e sem deslamagem.....	35
Figura 11 - Comparativo entre os testes realizados, considerando a recuperação mássica, metálica e o teor de ferro (%)	38
Figura 12 - Resultado da separação magnética utilizando a matriz Antiga.....	40
Figura 13 - Resultado da separação magnética utilizando a matriz <i>Mega</i> BigFLUX®	41
Figura 14 - Resultado da separação magnética utilizando a matriz <i>Super</i> BigFLUX®	42
Figura 15 - Análise Granulométrica da Alimentação	43
Figura 16 - Distribuição Granuloquímica nas Alimentações com Deslamagem e Sem Deslamagem	44
Figura 17 - Análise Granuloquímica do Concentrado da alimentação sem deslamagem	45
Figura 18 - Análise Granuloquímica do Concentrado da alimentação com deslamagem.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANT	-	Antiga
Fe	-	Ferro
LIMS	-	Low Intensity Magnetic Separator
MBF	-	Mega BigFLUX®
ROM	-	Run of Mining
SCV	-	Scavenger
STD	-	Standard
SBF	-	Super BigFLUX®
UFSCV	-	Underflow Scavenger
WHIMS	-	Wet High Intensity Magnetic Separator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Minério de Ferro e Processamento Mineral	15
3.2	Separação Magnética: Princípios e Fundamentos	17
3.2.1	Princípios do Magnetismo	17
3.2.2	Separação magnética como técnica de concentração	23
3.2.3	Classificação Magnética	24
3.2.4	Matrizes de Separação	27
3.2.5	Variáveis da Separação Magnética	30
3.2.6	Propriedades Reológicas da Lama	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1	Fluxograma do Processo de Beneficiamento	32
4.2	Coleta e Preparação das Amostras	33
4.3	Ensaio em Escala Piloto	34
4.4	Cálculo da Recuperação Mássica	36
4.5	Granulometria da Alimentação	37
4.6	Análise Química	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	Testes Realizados	38
5.1.1	Comparação dos testes com melhores resultados	39
5.2	Análise Granulométrica	42
5.3	Análise Granuloquímica	44
6	CONCLUSÕES	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

O minério de ferro é um dos recursos minerais mais importantes da economia mundial, pois é essencial para a produção de aço. O aço, por sua vez, desempenha papel vital em setores como construção civil, infraestrutura, transporte e manufatura, sustentando o desenvolvimento econômico e social de países ao redor do mundo. No Brasil, grandes reservas de minério de ferro, como as do Quadrilátero Ferrífero, são compostas principalmente por hematita e itabirito. Os itabiritos, formados por bandas alternadas de sílica e óxidos de ferro, possuem menor teor de ferro em relação aos minérios hematíticos, exigindo processos mais complexos de beneficiamento para viabilizar sua concentração. Já os minérios hematíticos de alto teor são mais facilmente beneficiáveis, permitindo a obtenção de produtos comerciais com métodos mais simples de processamento. (RIBEIRO *et al.*, 2017; VALÉRIO *et al.*, 2022).

Com o aumento da demanda global por aço e a exploração contínua dessas jazidas de minério de ferro, tem-se observado minérios mais complexos, disseminados e com liberação finas, impulsionando a necessidade de processar minérios de menor teor. A aplicação de tecnologias avançadas de concentração, como a separação magnética, tornou-se essencial para permitir que os minerais de interesse de minérios refratários sejam recuperados das gangas de forma econômica e com menor impacto ambiental (SOUZA, 2010).

Os separadores magnéticos de alta intensidade, como o WHIMS (*Wet High Intensity Magnetic Separator*), foram desenvolvidos para processar minérios de baixo teor, com menos de 45% de Fe, e partículas finas. Esses equipamentos possuem capacidade de processamento que pode chegar a 1400 toneladas por hora (tph) de polpa de minério, o que faz dos separadores magnéticos uma solução viável para a recuperação de rejeitos e o aproveitamento de partículas que, de outra forma, seriam descartadas, promovendo a sustentabilidade econômica e ambiental (RIBEIRO *et al.*, 2017). Isso ocorre porque a recuperação de finos reduz o volume de rejeitos, um passivo ambiental amplamente discutido, especialmente após desastres envolvendo barragens de mineração. Além do benefício ambiental, a maximização da recuperação de finos contribui diretamente para o aumento da receita da operação, tornando o processo mais eficiente e economicamente viável. Considerando que a mineração é uma atividade essencialmente produtiva, a otimização do aproveitamento dos recursos disponíveis torna-se fundamental para a sustentabilidade do setor.

Além disso, a concentração magnética tem sido utilizada em condições específicas para recuperação de partículas ultrafinas (de 1 a 10 μm) e finas (menor que 45 μm), que, por seu pequeno tamanho, não podem ser facilmente concentradas por métodos convencionais. Estudos apontam que essa técnica pode levar a recuperações de até 80% da massa, com um teor de ferro elevado e teor reduzido de sílica (VALÉRIO *et al.*, 2022; PAPINI *et al.*, 2018). Além disso, o método possibilita a exploração de depósitos antes considerados economicamente inviáveis, expandindo a vida útil das minas.

A exploração contínua das reservas de minério de ferro com teor superior a 60% de Fe, classificadas como de alto teor, tem levado ao esgotamento gradual dessas jazidas, criando uma pressão para que a indústria de mineração se adapte ao beneficiamento de minérios de baixo teor, e sua liberação fina, que demandam processos mais complexos e onerosos para garantir a viabilidade econômica. Tais minérios são caracterizados pela presença de altas proporções de finos e lamas, gerados nas etapas de cominuição e beneficiamento, que reduzem a eficiência dos processos de concentração e aumentam o volume de rejeitos. Estes rejeitos, frequentemente dispostos em barragens, representam não só uma perda econômica, mas também um grande desafio ambiental (PAPINI *et al.*, 2018; VALÉRIO, 2022; RIBEIRO *et al.*, 2017).

A presença de partículas finas e lamas dificulta a separação magnética, o que interfere na recuperação das partículas de ferro e aumenta o teor de minerais de ganga no concentrado final. Processos que buscam remover lamas por meio da deslamagem conseguem aumentar a seletividade e a recuperação de ferro e podem resultar em perdas de partículas de interesse, exigindo o desenvolvimento de alternativas que equilibrem recuperação e teor do concentrado. Observa-se que rotas de beneficiamento sem a remoção de lamas resultam em recuperação reduzida de ferro e aumento do teor de sílica, uma impureza indesejável que compromete o teor do produto (PAPINI *et al.*, 2018; VALÉRIO *et al.*, 2022).

Diante desse desafio, o desenvolvimento e uso de separadores magnéticos de última geração, capazes de operar com eficiência em faixas de alta intensidade e com matrizes especializadas para partículas finas, têm possibilitado avanços significativos no beneficiamento de minérios de baixo teor (SOUZA, 2010).

Assim, este trabalho visa analisar a influência da deslamagem na concentração magnética de minérios de ferro de baixo teor. Ao comparar as rotas de beneficiamento com e

sem deslamagem, avaliou-se a recuperação de ferro e o teor de minerais de ganga nos concentrados obtidos. A identificação das condições operacionais ideais poderá não apenas maximizar o aproveitamento dos recursos minerais, mas também reduzir o passivo ambiental, promovendo uma indústria de mineração mais sustentável e preparada para os desafios futuros.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar a concentração de minério de ferro por separação magnética de alta intensidade em duas rotas alternativas: alimentação com deslamagem e alimentação sem deslamagem.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- a) Realizar testes em escala piloto utilizando o separador magnético de alta intensidade do tipo WHIMS modelo Minimag;
- b) Identificar a melhor rota alternativa de alimentação para maximizar a eficiência do processo em plantas de concentração de minério de ferro.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Minério de Ferro e Processamento Mineral

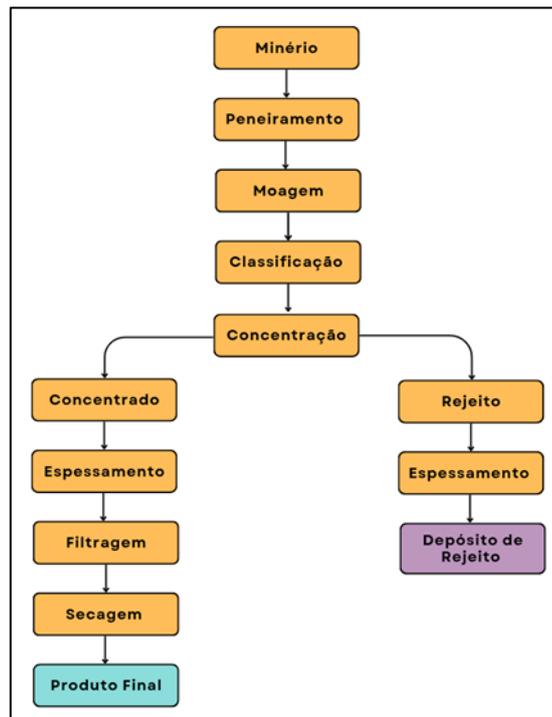
O minério de ferro é a principal matéria-prima para a produção de aço, indispensável na construção civil, indústria automobilística e outros setores. No Brasil, destacam-se jazidas como as do Quadrilátero Ferrífero e da Serra dos Carajás, onde predominam hematita e itabirito, sendo este último formado por bandas alternadas de óxidos de ferro e sílica. A exploração contínua de jazidas de alto teor resultou em seu esgotamento gradual, forçando a indústria a explorar minérios de menor teor de ferro, que exigem tecnologias de concentração mais avançadas (SAMPAIO *et al.*, 2017; WILLS *et al.*, 2016).

O beneficiamento mineral é um conjunto de operações realizadas para transformar o minério extraído da natureza em um produto com maior teor do mineral de interesse, adequado para aplicações industriais. Esse processo busca melhorar a qualidade do minério por meio da remoção de minerais de ganga e da adequação granulométrica, maximizando o aproveitamento econômico e reduzindo impactos ambientais (SAMPAIO *et al.*, 2017). O beneficiamento ocorre por meio de diferentes tecnologias que podem ser aplicadas dependendo da natureza do minério, do tamanho das partículas e das exigências do mercado consumidor.

No caso do minério de ferro, as etapas iniciais incluem a cominuição, que consiste nos processos de britagem e moagem, responsáveis por reduzir o tamanho das partículas e liberar os minerais de ferro das gangas (WILLS *et al.*, 2016). Em seguida, ocorre a classificação granulométrica, que pode ser realizada por peneiramento ou ciclonação, separando as frações conforme sua granulometria e permitindo melhor desempenho nos processos subsequentes (BEZERRA, 2017). O minério então passa por um processo de concentração, onde técnicas como a separação magnética de baixa e alta intensidade, e a flotação, são aplicadas para aumentar o teor de ferro e reduzir minerais de ganga, como sílica e alumina (Ribeiro *et al.*, 2022). Após a concentração, ocorre o desaguamento, por meio de espessamento e filtração, para reduzir a umidade do concentrado antes de sua comercialização. Os rejeitos resultantes podem ser dispostos em barragens, empilhamentos drenados ou serem reaproveitados em outras indústrias, como a de cimento e construção civil (SAMPAIO *et al.*, 2017).

O fluxograma tradicional do beneficiamento de minério de ferro segue uma sequência de etapas bem estabelecida, que pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma padrão de um Beneficiamento do Minério



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A presença de lamas e finos gerados durante as etapas de cominuição é um dos maiores desafios no beneficiamento de minérios de baixo teor. Essas partículas reduzem a eficiência dos processos de concentração e há maior dificuldade em separar os minerais de interesse. Apesar disso, o aproveitamento desses minérios é essencial para prolongar a vida útil das jazidas, reduzir passivos ambientais e atender à crescente demanda por ferro (RIBEIRO *et al.*, 2022).

A geração de rejeitos durante o beneficiamento é inevitável, sendo composta por frações grossas e lamas. As lamas, compostas por partículas finas menores que 37 μm , apresentam maior teor de ferro em comparação às frações grossas. Segundo Bezerra (2017), até 27% dos rejeitos gerados em algumas plantas podem ser classificados como lamas, com teores de ferro até 50% superiores aos rejeitos grossos.

No estudo de Bezerra (2017), a separação das lamas foi realizada por meio de ciclonagem e sedimentação. Esses processos dividiram o material em duas frações principais:

- a) Fração Grossa: Com partículas acima de 37 μm , predominantemente compostas por minerais de ganga, como quartzo. Essa fração foi descartada como rejeito final.

- b) Fração Fina (Lamas): Composta por partículas menores que 37 μm , contendo maior proporção de minerais de ferro, sendo direcionada para a concentração magnética de alta intensidade.

A ciclonagem foi eficaz na separação de partículas com base em suas características de tamanho e densidade. Após a separação inicial, a fração fina foi submetida a processos adicionais, como testes de decantação, onde o comportamento sedimentar das partículas foi avaliado. Ajustes de pH e o uso de coagulantes foram realizados para otimizar a sedimentação e minimizar perdas de ferro durante o descarte do rejeito (BEZERRA, 2017).

O estudo da Bezerra (2017) demonstrou que a integração de métodos de ciclonagem e concentração magnética foi capaz de recuperar até 80% da fração fina em concentrados com alto teor de ferro, reduzindo significativamente o volume de rejeitos finais. Isso destaca o papel da deslamagem como uma etapa estratégica no beneficiamento sustentável de minérios de ferro.

A deslamagem é uma etapa crucial para melhorar a eficiência dos processos de concentração, especialmente em frações finas. No entanto, também resulta em perdas de partículas de interesse, como hematita e goethita, que podem ser recuperadas em etapas subsequentes. Estudos indicam que rotas alternativas de beneficiamento, que equilibram a remoção de lamas com a recuperação de frações finas, podem aumentar a seletividade e a eficiência global do processo (RIBEIRO *et al.*, 2022).

A gestão de rejeitos é um desafio central na mineração moderna. Alternativas como o reaproveitamento de rejeitos em outras cadeias produtivas, como na fabricação de cimento e materiais de construção civil, têm sido exploradas para mitigar os impactos ambientais. Essa abordagem promove a sustentabilidade ao reduzir a dependência de barragens e ao minimizar os riscos associados a desastres ambientais (BEZERRA, 2017; SAMPAIO *et al.*, 2017).

3.2 Separação Magnética: Princípios e Fundamentos

3.2.1 Princípios do Magnetismo

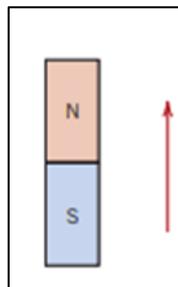
O magnetismo é uma propriedade física associada à presença de dipolos magnéticos, que consistem em dois polos opostos de igual magnitude, chamados de polo Norte (N) e polo Sul (S). Esses polos magnéticos formam um sistema semelhante ao de um ímã comum. A formação de dipolos magnéticos pode ocorrer devido à orientação dos elétrons em átomos ou

ao movimento de cargas elétricas, como em correntes elétricas circulando em espirais (CALLISTER *et al.*, 2016).

Além disso, o magnetismo é diretamente influenciado pela configuração eletrônica dos átomos. Os momentos magnéticos, associados ao movimento orbital e ao "spin" dos elétrons, são fundamentais para a manifestação do magnetismo. Apenas os elétrons desemparelhados contribuem efetivamente para o magnetismo, enquanto pares de elétrons anulam seus momentos magnéticos (ARAÚJO, 2009).

O momento magnético de um dipolo é definido como o produto entre a força do polo magnético e a distância entre os polos. Esse momento é representado por um vetor que aponta do polo negativo para o polo positivo e cuja magnitude é diretamente proporcional ao valor de cada polo e à distância que os separa. O campo magnético gerado por um dipolo é mais intenso próximo aos polos e diminui rapidamente à medida que se afasta deles, apresentando uma distribuição espacial característica. (CALLISTER *et al.*, 2016).

Figura 2 - Momento magnético de um dipolo



Fonte: Callister e Retwisch (2016)

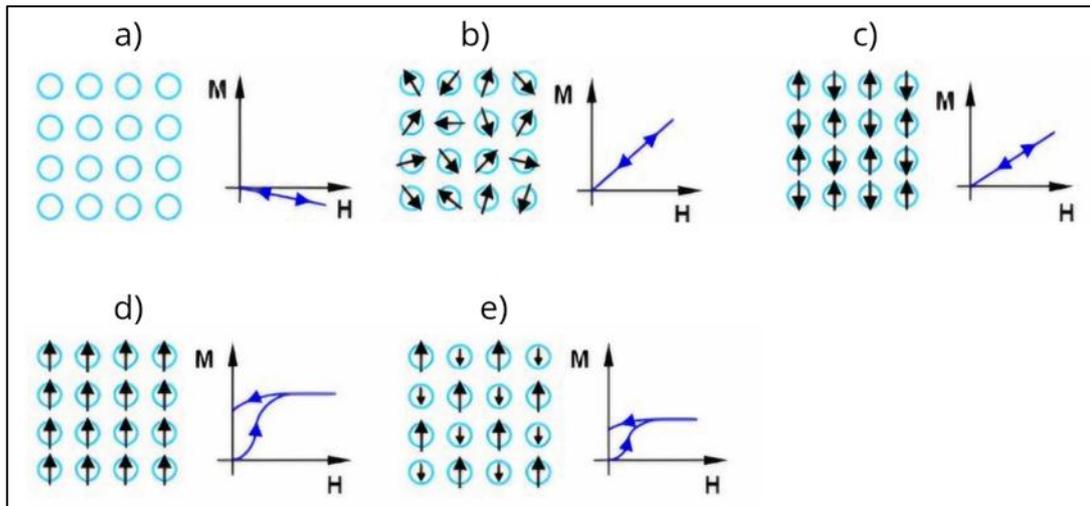
Os materiais podem ser classificados com base em sua resposta a um campo magnético externo, determinada pela sua suscetibilidade magnética (χ). Essa propriedade é calculada como a razão entre a magnetização do material (M) e a intensidade do campo magnético externo (H), expressa pela equação:

$$\chi = M/H \quad (1)$$

De acordo com Callister e Rethwisch, (2016), a suscetibilidade magnética depende de fatores como: composição química; estrutura cristalina; tamanho do grão; e temperatura. Os materiais são classificados conforme o comportamento na presença de um campo magnético, conforme ilustrado na figura 3:

- a) Materiais diamagnéticos: possuem suscetibilidade magnética negativa, ou seja, que são repelidos pelo campo magnético externo. Isso ocorre devido à formação de dipolos magnéticos induzidos, que se orientam em direção oposta ao campo aplicado. Exemplos incluem cobre, prata e ouro.
- b) Materiais paramagnéticos: têm suscetibilidade magnética positiva, sendo fracamente atraídos pelo campo externo. Os dipolos magnéticos desses materiais se alinham na mesma direção do campo aplicado. Exemplos incluem alumínio, platina e óxido de manganês.
- c) Materiais ferromagnéticos: apresentam alta suscetibilidade magnética e podem manter a magnetização mesmo após a remoção do campo externo. Isso ocorre devido à interação dos momentos magnéticos atômicos, que se alinham na mesma direção, formando domínios magnéticos. Exemplos incluem ferro, níquel e cobalto.
- d) Materiais antiferromagnéticos: os momentos magnéticos atômicos alinham-se em direções opostas dentro da estrutura cristalina, resultando em um cancelamento global do magnetismo. Esses materiais não exibem comportamento magnético aparente na ausência de um campo externo.
- e) Materiais ferrimagnéticos: o ferrimagnetismo é similar ao antiferromagnetismo, mas os momentos magnéticos atômicos não se anulam completamente, criando um magnetismo líquido. Esse comportamento é observado em materiais como magnetita (Fe_3O_4), sendo amplamente aplicado na indústria devido à sua resposta magnética intermediária.

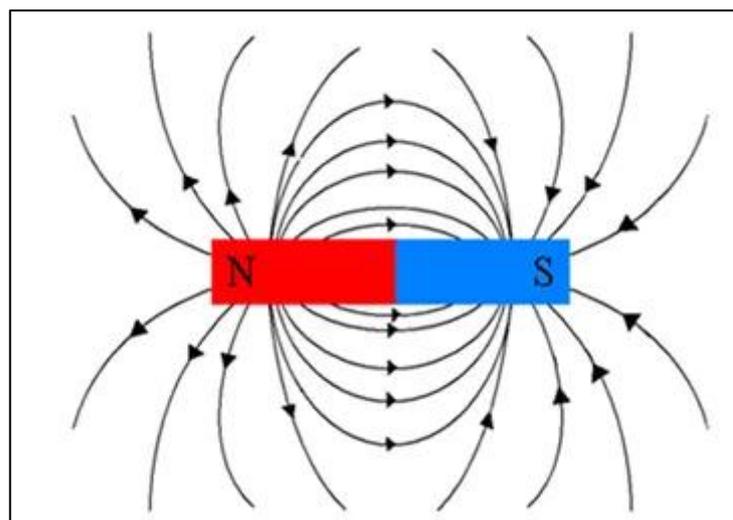
Figura 3 - Materiais Magnéticos: Dipolos e Gráficos $M \times H$ - a) Diamagnéticos; b) Paramagnéticos; c) Ferromagnéticos; d) Antiferromagnéticos; e) Ferrimagnéticos



Fonte: Araújo (2009)

A comparação dos comportamentos das curvas de densidade de fluxo magnético (B) em função da intensidade do campo magnético (H) para materiais paramagnéticos, diamagnéticos e ferromagnéticos/ferrimagnéticos revela diferenças significativas na resposta dos materiais a um campo externo. Essa relação pode ser melhor compreendida por meio da Figura 4, que ilustra a representação do campo magnético ao redor de um dipolo magnético, destacando a direção do fluxo magnético que emerge do polo norte (N) e retorna ao polo sul (S).

Figura 4 - Linhas de Indução do Campo Magnético



Fonte: UFRGS (2018)

A relação entre a densidade de fluxo magnético B e a intensidade do campo magnético H é expressa pela equação:

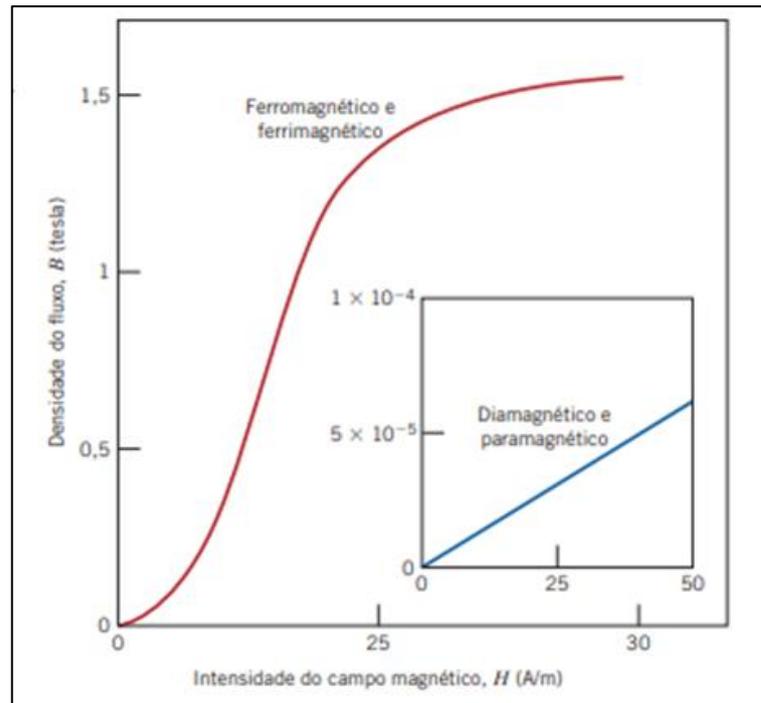
$$B = \mu H \quad (2)$$

Sendo, μ representando a permeabilidade magnética do meio. Essa equação descreve como um campo magnético externo influencia a densidade de fluxo nos diferentes tipos de materiais, evidenciando que materiais ferromagnéticos apresentam valores significativamente mais elevados de B em comparação aos materiais paramagnéticos e diamagnéticos.

Nos materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos, observa-se um aumento expressivo da densidade de fluxo magnético em resposta ao campo aplicado, resultando em um comportamento não linear na curva B versus H . Em contraste, materiais paramagnéticos e diamagnéticos apresentam uma resposta fraca e linear ao campo magnético externo, gerando campos de fluxo B extremamente pequenos. Essa diferença explica por que esses materiais são frequentemente considerados como não magnéticos em diversas aplicações industriais (CALLISTER *et al.*, 2016).

A Figura 5 ilustra esse comportamento, evidenciando a resposta proporcional e linear dos materiais paramagnéticos e diamagnéticos ao campo magnético, enquanto os ferromagnéticos e ferrimagnéticos demonstram um comportamento intensificado e não linear. Embora a suscetibilidade magnética dos materiais paramagnéticos e diamagnéticos seja pequena, a densidade de fluxo gerada ainda é perceptível, porém muito inferior à observada nos materiais ferromagnéticos.

Figura 5 - Comparação entre os comportamentos de B em função de H para materiais ferromagnéticos/ferrimagnéticos e diamagnéticos/paramagnéticos



Fonte: Callister e Retwisch (2016)

Em contraste, os materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos apresentam uma resposta mais complexa e saturada, como evidenciado pela curva não linear de B versus H . Isso ocorre porque, em materiais ferromagnéticos, os momentos magnéticos atômicos se alinham para formar domínios magnéticos, o que resulta em uma magnetização muito maior, mesmo após a remoção do campo magnético. A densidade de fluxo em um campo de H com intensidade de 50 A/m, por exemplo, pode alcançar cerca de 1,5 tesla para materiais ferromagnéticos/ferrimagnéticos, enquanto para materiais paramagnéticos e diamagnéticos, essa densidade de fluxo é significativamente menor.

Essa grande diferença nas escalas de B entre os materiais paramagnéticos, diamagnéticos e ferromagnéticos destaca a razão pela qual materiais paramagnéticos e diamagnéticos são frequentemente considerados como "não magnéticos". Apesar de sua resposta ao campo magnético ser fraca, a magnitude da densidade de fluxo é consideravelmente menor, o que os torna insignificantes para muitas aplicações em separação magnética e outras tecnologias baseadas em propriedades magnéticas (CALLISTER *et al.*, 2016).

O comportamento magnético dos materiais tem um impacto direto nos processos de separação magnética. Equipamentos modernos, como separadores de alta intensidade

(WHIMS), são projetados para explorar essas propriedades e separar minerais de interesse (ferromagnéticos e paramagnéticos) de minerais de ganga (diamagnéticos). A compreensão das propriedades magnéticas é essencial para ajustar variáveis operacionais, como a intensidade do campo, e otimizar a recuperação mineral (CALLISTER *et al.*, 2016).

3.2.2 Separação magnética como técnica de concentração

A separação magnética é um dos métodos mais eficientes para concentrar minerais de ferro, baseando-se na diferença de susceptibilidade magnética entre os minerais de interesse e os minerais de ganga. Minerais ferromagnéticos, como a magnetita, possuem alta susceptibilidade e são fortemente atraídos por campos magnéticos. Já minerais paramagnéticos, como a hematita e a goethita, possuem uma atração mais fraca, enquanto minerais diamagnéticos, como quartzo e calcita, não interagem com o campo (WILLS *et al.*, 2016).

A separação magnética pode ser aplicada tanto a seco quanto a úmido. A separação a seco é geralmente utilizada em granulometrias mais grossas, enquanto a separação úmida é preferida para frações finas, onde a presença de água facilita a dispersão das partículas e aumenta a eficiência do processo. Separadores magnéticos modernos, como os de alta intensidade (WHIMS), podem alcançar campos superiores a 10.000 Gauss, permitindo a recuperação de partículas finas e ultrafinas de minerais fracamente magnéticos, como hematita e goethita (RIBEIRO *et al.*, 2022).

A eficiência do processo de separação magnética depende de variáveis como intensidade do campo, granulometria do material alimentado e taxa de alimentação. Em minérios de baixo teor, o uso de separadores de alta intensidade permite alcançar concentrados com teores mais elevados e menor presença de minerais de ganga, atendendo às exigências do mercado siderúrgico (SAMPAIO *et al.*, 2017). Além dessas variáveis, a utilização de uma etapa de deslamagem no processamento de minério pode impactar o desempenho do processo. Por um lado, a remoção de partículas finas aumenta a seletividade, por outro lado, pode resultar na perda de minerais de ferro presentes na fração lamelar. Assim, a escolha entre rotas de processamento que incluem a deslamagem ou não deslamagem deve ser baseada em critérios técnicos e econômicos (SAMPAIO *et al.*, 2017).

Portanto, a recuperação de partículas finas e ultrafinas representa um dos maiores desafios na separação magnética. Esses minerais, devido à sua baixa massa e alta relação

superfície-volume, demandam campos magnéticos mais intensos e matrizes com maior seletividade. Para superar esses desafios, novos designs de equipamentos e matrizes otimizadas foram desenvolvidos, permitindo maior eficiência na separação de partículas paramagnéticas e redução de perdas operacionais (SAMPAIO *et al.*, 2017).

O desenvolvimento contínuo de tecnologias avançadas também tem permitido o aproveitamento de rejeitos antes descartados, aumentando a recuperação mássica e reduzindo passivos ambientais. A utilização de separadores magnéticos de alta intensidade em plantas de concentração industrial é um exemplo claro desse avanço, viabilizando o tratamento de minérios de baixo teor com eficiência e sustentabilidade (CALLISTER *et al.*, 2016).

3.2.3 Classificação Magnética

Os equipamentos de separação magnética são classificados conforme a intensidade do campo magnético gerado e o tipo de operação. Equipamentos de baixa intensidade (LIMS) operam com campos de até 5 Gauss e são projetados para recuperar partículas de alta susceptibilidade magnética, como magnetita, em granulometrias mais grossas. Já os separadores de alta intensidade (WHIMS) utilizam campos magnéticos superiores a 10.000 Gauss e são empregados na concentração de partículas finas e ultrafinas de minerais paramagnéticos, como hematita (WILLS *et al.*, 2016).

Além da intensidade do campo, os separadores também variam quanto ao meio de operação, podendo ser secos ou úmidos. Os separadores secos são ideais para granulometrias maiores e ambientes onde o uso de água é restrito. Já os separadores a úmido são mais eficazes em frações finas o que minimiza perdas durante o processamento. A escolha do equipamento depende das características do minério e do objetivo do beneficiamento (RIBEIRO *et al.*, 2022).

O avanço tecnológico tem permitido a produção de separadores mais eficientes, capazes de operar em altas taxas de alimentação sem comprometer a recuperação mássica. Esses equipamentos são indispensáveis no tratamento de minérios de ferro de baixo teor, ampliando a viabilidade econômica do beneficiamento (SAMPAIO *et al.*, 2017).

Os separadores magnéticos desempenham um papel fundamental na concentração de minérios ferromagnéticos e na recuperação de minerais fracamente magnéticos, sendo amplamente utilizados na indústria mineral. Esses equipamentos podem ser classificados de

acordo com a intensidade do campo magnético gerado e o meio em que operam, podendo ser de baixa ou alta intensidade, além de funcionarem a seco ou via úmida. A escolha do separador adequado depende de diversos fatores, como a susceptibilidade magnética dos minerais presentes, a granulometria da alimentação e os requisitos do processo industrial.

Os separadores de baixa intensidade via úmida, conhecidos como LIMS (*Low Intensity Magnetic Separator*), operam em faixas de campo magnético de aproximadamente 500 a 5.000 Gauss e são amplamente empregados na concentração de minérios altamente magnéticos, como a magnetita. O princípio de funcionamento do LIMS baseia-se na utilização de um tambor rotativo parcialmente submerso em um tanque, onde a polpa contendo o minério de ferro é alimentada. Ímãs permanentes fixados no interior do tambor criam um campo magnético que atrai as partículas ferromagnéticas, que aderem à superfície do tambor e são transportadas para fora do tanque, onde são removidas mecanicamente ou por fluxo de água. Os minerais não magnéticos, por sua vez, permanecem na polpa e são direcionados para a fração de rejeito. A eficiência desse equipamento depende de fatores como a velocidade do tambor, o ângulo de montagem dos ímãs e a concentração de sólidos na polpa. O LIMS é amplamente utilizado em circuitos de concentração de minério de ferro, especialmente em estágios primários de separação, podendo ser combinado com etapas de moagem para maximizar a recuperação da magnetita ao longo do processo (PARKER, 1977; DARDIS, 1989; MORGAN *et al.*, 1993).

Para a recuperação de minerais fracamente magnéticos, como hematita, goethita e ilmenita, utiliza-se o separador magnético de alta intensidade via úmida, conhecido como WHIMS (*Wet High Intensity Magnetic Separator*). Esse equipamento opera com campos magnéticos que podem atingir até 18.000 Gauss, sendo projetado para a recuperação de partículas finas e ultrafinas que apresentam baixa susceptibilidade magnética. O funcionamento do WHIMS é baseado na aplicação de um campo magnético intenso gerado por eletroímãs sobre uma matriz ferromagnética de alta permeabilidade, a qual amplifica localmente a intensidade do campo e cria gradientes magnéticos que permitem a atração seletiva de minerais de interesse.

Durante a operação, a polpa contendo o minério é alimentada no equipamento e passa através da matriz magnética, onde os minerais paramagnéticos ficam retidos devido às forças exercidas pelo campo magnético. Os minerais não magnéticos são arrastados pelo fluxo de água e direcionados à fração de rejeito. Para a remoção do concentrado, o campo magnético é desligado ou reduzido, permitindo que os minerais retidos sejam liberados e coletados

separadamente. Diferentes tipos de matrizes podem ser utilizadas para otimizar o desempenho do WHIMS, sendo as mais comuns compostas por placas de aço inoxidável, anéis ou elementos tubulares de alta permeabilidade. Estudos demonstram que o uso de matrizes do tipo BigFLUX® pode reduzir obstruções e melhorar a eficiência do processo, garantindo uma melhor distribuição do fluxo de polpa e minimizando perdas de ferro na fração rejeitada (RIBEIRO *et al.*, 2022).

Além disso, o desempenho do WHIMS pode ser otimizado por meio de ajustes na intensidade do campo magnético, na taxa de alimentação e na concentração de sólidos na polpa. A deslamagem prévia da alimentação tem se mostrado uma estratégia eficaz para melhorar a seletividade do processo, reduzindo a presença de partículas finos de ganga que podem comprometer a eficiência da separação. Em processos de beneficiamento de minérios de ferro itabiríticos, por exemplo, a combinação do WHIMS com circuitos de flotação ou etapas adicionais de separação magnética tem permitido alcançar recuperações superiores a 80% para partículas menores que 37 μm (STENER *et al.*, 2016).

Os separadores magnéticos de tambor representam outra alternativa amplamente utilizada na indústria mineral para a concentração de minérios ferromagnéticos. Esses equipamentos podem operar tanto a seco quanto a úmido, dependendo da aplicação e das características do minério processado. No caso da operação a úmido, o princípio de funcionamento é semelhante ao do LIMS, onde o tambor rotativo está parcialmente submerso em um tanque e a separação ocorre à medida que as partículas magnéticas são atraídas pelo campo gerado pelos ímãs fixados no interior do tambor. Esse tipo de separação é frequentemente utilizado em circuitos de concentração de minério de ferro, garantindo alta eficiência na recuperação da magnetita.

Já na operação a seco, o minério é alimentado sobre a superfície do tambor em estado granuloso, sem o uso de água. Nesse caso, as partículas magnéticas são atraídas pelo campo gerado pelos ímãs internos e transportadas para uma zona separada do equipamento, enquanto as partículas não magnéticas caem livremente na fração de rejeito. Esse tipo de separação é indicado para aplicações em que o uso de água não é viável, como em regiões com restrições hídricas ou em processos de pré-concentração antes da etapa de moagem (SAMPAIO *et al.*, 2017).

Os separadores de tambor, tanto a seco quanto a úmido, são bastante versáteis e podem ser utilizados em diferentes estágios do beneficiamento mineral. Quando empregados como pré-concentradores, permitem a remoção inicial de frações não magnéticas, reduzindo o volume de material a ser processado em etapas subsequentes e aumentando a eficiência energética do circuito. Além disso, em plantas de beneficiamento que lidam com rejeitos magnéticos, os separadores de tambor podem ser utilizados para a recuperação de finos de magnetita contidos nos resíduos, promovendo um maior aproveitamento dos recursos minerais.

A escolha entre os diferentes tipos de separadores magnéticos deve considerar não apenas a susceptibilidade magnética do minério, mas também fatores como granulometria da alimentação, teor de ferro desejado no concentrado e viabilidade econômica do processo. O avanço das tecnologias de separação magnética tem possibilitado um aumento significativo na recuperação de ferro em minérios de baixo teor, tornando o beneficiamento mais eficiente e sustentável.

3.2.4 Matrizes de Separação

As matrizes magnéticas desempenham um papel essencial nos separadores de alta intensidade, permitindo a amplificação do gradiente de campo magnético e a captura eficiente de partículas finas. Diferentes configurações de matrizes, como placas sulcadas e bolas de aço, são utilizadas para gerar gradientes magnéticos que otimizam a separação. A escolha da matriz depende de fatores como granulometria do minério, composição mineralógica e condições operacionais (SAMPAIO *et al.*, 2017).

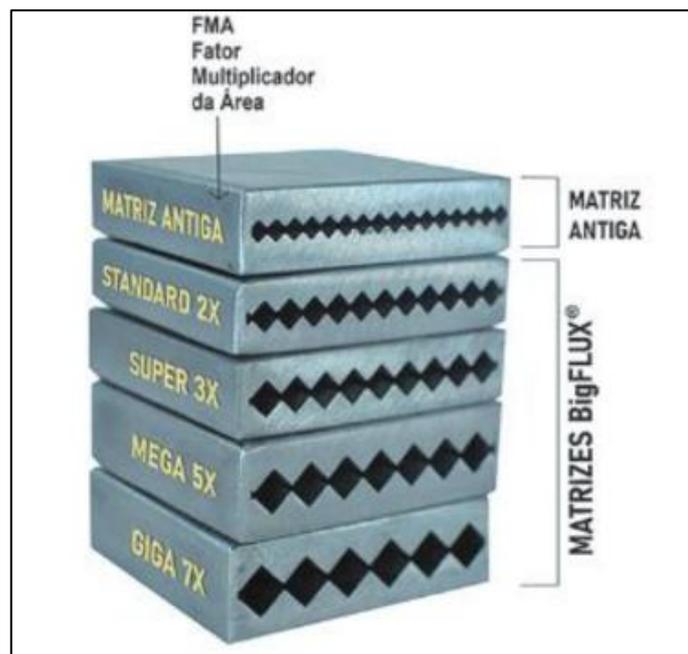
As matrizes também precisam ser resistentes ao desgaste e ao entupimento, características comuns em minérios com alta proporção de lamas. O uso de materiais como aço inoxidável é preferido devido à sua durabilidade e facilidade de limpeza. Essas propriedades são fundamentais para manter a eficiência do processo e reduzir custos operacionais (SAMPAIO *et al.*, 2017).

A eficiência das matrizes pode ser influenciada pela distribuição granulométrica do material alimentado. Partículas finas requerem maior intensidade de campo e configurações de matriz que maximizem a área de captura. Estudos recentes mostram que ajustes no espaçamento e na geometria da matriz podem aumentar significativamente a recuperação e reduzir as perdas de minerais valiosos (RIBEIRO *et al.*, 2022).

Além disso, modelos mais modernos de matrizes magnéticas foram desenvolvidos para ampliar a área útil de separação e otimizar o fluxo da polpa, possibilitando um aumento significativo na capacidade de alimentação dos separadores magnéticos sem comprometer a seletividade. Essas inovações tecnológicas permitem que plantas de beneficiamento operem com maior eficiência, garantindo melhor aproveitamento do minério e reduzindo perdas no processo.

As matrizes convencionais apresentam um espaçamento entre os elementos magnéticos que influencia a distribuição do campo magnético e a retenção das partículas magnéticas. Já as matrizes de última geração foram desenvolvidas para aumentar a área útil de separação, otimizando a seletividade e a eficiência do processo. Na Figura 6, é possível observar a comparação entre a matriz convencional, ou Antiga, e os modelos de matrizes BigFLUX®, que possuem um design otimizado para ampliar a capacidade de alimentação sem comprometer a qualidade da separação.

Figura 6 - Comparação entre a matriz Antiga e os modelos de matrizes BigFLUX® para o mesmo GAP



Fonte: Gaustec (2023)

A matriz Antiga possui uma área de passagem mais limitada, o que pode restringir o fluxo da polpa e reduzir a eficiência da separação magnética. Seu *design* tradicional resulta em menor aproveitamento do campo magnético, impactando a retenção das partículas magnéticas.

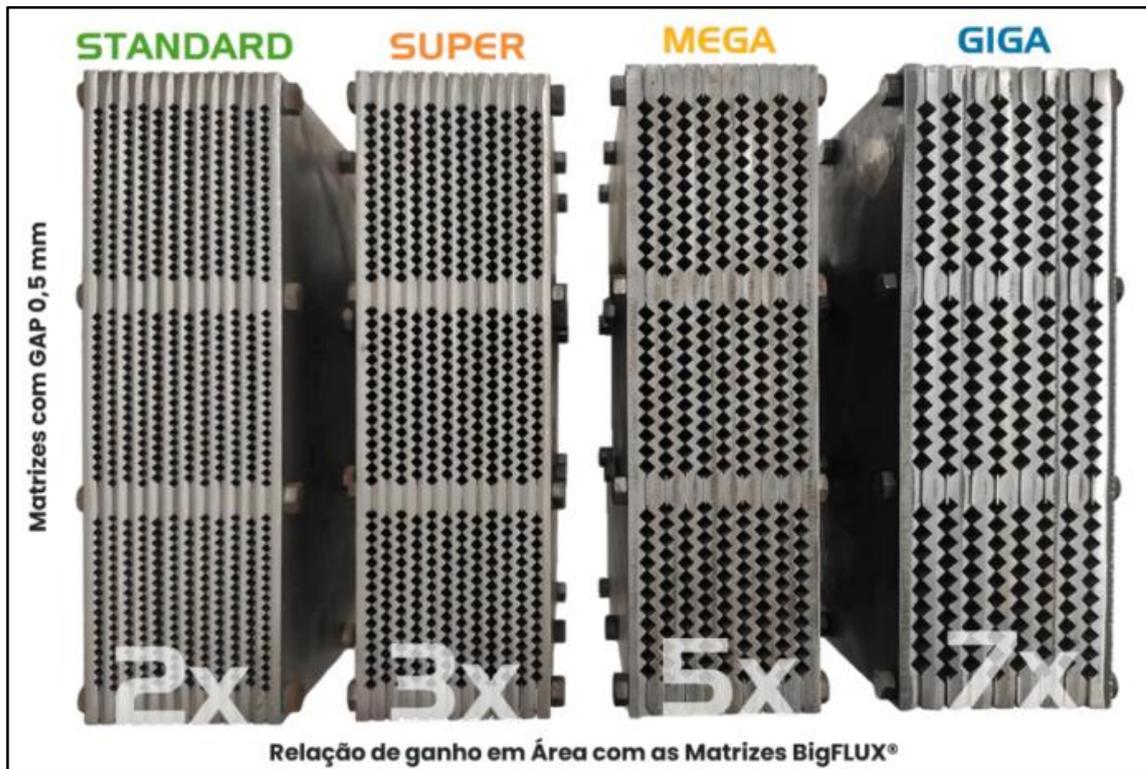
O modelo de matriz *Standard* apresenta uma abertura duas vezes maior do que a matriz Antiga, permitindo uma melhor distribuição da polpa e reduzindo o risco de obstruções. Já o modelo de matriz *Super BigFLUX®* expande essa abertura para três vezes o tamanho original, otimizando a fluidez da polpa e aumentando a seletividade do processo de separação.

O modelo *Mega BigFLUX®* amplia ainda mais a área de passagem, atingindo um valor cinco vezes maior que o da matriz Antiga. Essa configuração melhora a eficiência da separação magnética ao reduzir a resistência ao fluxo da polpa e garantir uma distribuição mais uniforme das partículas magnéticas.

Por fim, a matriz *Giga BigFLUX®* representa a versão mais avançada, com uma abertura sete vezes maior do que a da matriz convencional. Esse design maximiza a capacidade de alimentação do separador magnético, mantendo a eficiência na recuperação de partículas de interesse e reduzindo o acúmulo de material nos espaços da matriz.

A Figura 7 apresenta os diferentes modelos dessas matrizes, evidenciando suas variações estruturais e os impactos que cada configuração pode ter no processo de separação magnética. Modelos mais avançados, com maior área ativa, favorecem um aumento no gradiente de campo, proporcionando maior seletividade e recuperação de partículas magnéticas.

Figura 7 - Modelos das matrizes BigFLUX®



Fonte: Gaustec (2023)

3.2.5 Variáveis da Separação Magnética

A eficiência da separação magnética é influenciada por várias variáveis operacionais e pelas propriedades do minério:

- **Intensidade do Campo Magnético:** Determina a força de atração sobre as partículas magnéticas. Em separadores de alta intensidade como os WHIMS, a intensidade do campo pode ser ajustada conforme a susceptibilidade dos minerais, melhorando a seletividade do processo.
- **Granulometria:** Partículas menores são mais facilmente capturadas, pois o campo magnético interage com uma área de superfície maior. Assim, processos que utilizam WHIMS priorizam frações finas para maximizar a recuperação de ferro (Ribeiro *et al.*, 2017).
- **Taxa de Alimentação:** Uma alimentação controlada evita sobrecarga e melhora a precisão da separação, reduzindo a contaminação por partículas não magnéticas.
- **Tipo de Matriz:** As matrizes amplificam o gradiente de campo e melhoram a captura de partículas. Matrizes BigFLUX®, por exemplo, aumentam o fluxo de

polpa e evitam obstruções, melhorando a capacidade de processamento (RIBEIRO *et al.*, 2022).

3.2.6 Propriedades Reológicas da Lama

As propriedades reológicas das polpas de minério de ferro, especialmente aquelas com alta fração de partículas finas, exercem forte influência sobre a eficiência dos processos de concentração, como a separação magnética. As características reológicas dizem respeito ao comportamento do fluido sob esforço de cisalhamento, sendo afetadas por fatores como viscosidade, carga de superfície das partículas, grau de dispersão e porcentagem de sólidos presentes na polpa.

A viscosidade é um dos parâmetros mais relevantes, pois está diretamente relacionada à mobilidade das partículas na suspensão. À medida que a fração de sólidos finos aumenta, também se eleva a interação entre partículas, formando estruturas coloidais que promovem o aumento da viscosidade. Essa elevação dificulta o escoamento e afeta negativamente a fluidez da polpa no interior dos separadores magnéticos, o que pode prejudicar tanto a recuperação quanto a seletividade do processo (POSSA *et al.*, 2010).

Além disso, as partículas finas tendem a apresentar alta área superficial específica e cargas superficiais elevadas, o que contribui para a formação de flocos ou agregados instáveis. Em sistemas com alta concentração de sólidos, essas interações intensificam a resistência ao escoamento, caracterizando um comportamento reológico não newtoniano, geralmente do tipo pseudoplástico ou plástico de Bingham. Esse comportamento implica na existência de uma tensão de escoamento, abaixo da qual a polpa não flui, impactando diretamente o desempenho operacional dos equipamentos de separação (POSSA *et al.*, 2010).

A dispersão adequada das partículas, promovida por ajustes de pH ou uso de dispersantes, pode contribuir para reduzir a viscosidade aparente da polpa e melhorar a estabilidade da suspensão, favorecendo o transporte hidráulico e a atuação do campo magnético sobre as partículas de interesse. Portanto, compreender e controlar as propriedades reológicas das polpas é essencial para otimizar as condições de operação e maximizar a recuperação de ferro em processos que lidam com materiais finos e lamas.

- Hematitinha (-31 mm +10 mm)
 - *Sinter Feed* (-10 mm +6,3 mm)
 - *Oversize* (material com granulometria superior que requer nova britagem)
- 3) Separação magnética de baixa e média intensidade: após a classificação, o material passa por separadores magnéticos:
 - LIMS (*Low Intensity Magnetic Separator*): separa partículas altamente magnéticas.
 - WDRE (*Wet Drum Rare Earth*): remove minerais fracamente magnéticos, otimizando a recuperação de ferro.
 - 4) Espirais: realizam uma concentração gravítica, separando partículas com base em sua densidade.
 - 5) Separação magnética de alta intensidade (GX500): utilizada para refinar o concentrado, removendo impurezas e recuperando ferro.
 - 6) Filtragem e disposição de rejeitos: O concentrado final passa por filtros prensa para remoção de umidade, resultando em um produto pronto para o mercado siderúrgico. Já os rejeitos são divididos em rejeito grosso e lamas desaguadas, sendo destinados a pilhas de disposição ou barragens.

4.2 Coleta e Preparação das Amostras

O minério proveniente do ROM apresenta uma baixa porcentagem de material magnético (8-10%), o que justifica a utilização de separadores magnéticos de baixa e média intensidade (LIMS e WDRE) no circuito industrial.

Para a realização deste estudo, as amostras foram coletadas diretamente do fluxo do GX500. A alimentação sem deslamagem foi obtida a partir do rejeito da etapa *Rougher* da planta, apresentando um teor de ferro de 27,59%. Já a alimentação com deslamagem foi coletada após a passagem desse mesmo rejeito pelo hidrociclone, que gera a alimentação da etapa *Scavenger*, resultando em um teor de ferro de 25,82%.

Após a coleta, o material foi submetido a processos de homogeneização e quarteamento, garantindo a representatividade da amostra e minimizando variações composicionais nos testes de separação magnética de alta intensidade em escala piloto.

4.3 Ensaios em Escala Piloto

Com o objetivo de simular a etapa *Scavenger* e avaliar a eficiência da separação magnética em diferentes cenários, comparando a recuperação de finos nas condições de alimentação com deslamagem e sem deslamagem. Considerando que a planta opera com diferentes porcentagens de sólidos para cada tipo de alimentação, os ensaios foram conduzidos com:

- 50% de sólidos para a alimentação com deslamagem;
- 40% de sólidos para a alimentação.

Os ensaios foram executados no separador magnético Minimag, de alta intensidade, ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Minimag



Fonte: Arquivo pessoal (2024)

Durante os testes, foram avaliadas diferentes condições operacionais para determinar a melhor relação entre teor de ferro e recuperação mássica, analisando tanto a recuperação total quanto a das frações mais finas dos concentrados. Para otimizar os resultados, variaram-se

parâmetros como o tipo de matriz magnética e a abertura da matriz (GAP), o campo magnético e a pressão da água de médio.

Os ensaios contemplaram quatro tipos de matrizes magnéticas: Antiga (ANT), *Standard* (STD), *Mega BigFLUX®* (MBF) e *Super BigFLUX®* (SBF). Cada uma foi testada sob diferentes configurações para avaliar sua eficiência na recuperação de ferro e seletividade da separação.

Os testes foram conduzidos para simular as condições reais de operação da planta, permitindo identificar ajustes necessários para otimizar a separação magnética. A análise dos resultados obtidos é essencial para garantir maior eficiência no beneficiamento, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Quadro com os resultados dos testes com alimentação *Scavenger* com deslamagem e sem deslamagem

Teste	Matriz	GAP (mm)	H₂O Conc. (kgf/cm²)	H₂O Médio (kgf/cm²)	Campo (Gauss)
SCV1	ANT-1H	2,5	4	4	10.000
SCV2	STD-1H	2,5	4	4	11.500
SCV3	SBF-1H	2,5	4	4	11.000
SCV4	MBF-1H	2,5	4	4	12.000
SCV5	SBF-1H	2,0	4	4	12.000
SCV6	MBF-1H	2,0	4	4	13.500
SCV7	MBF-1H	2,0	4	0	15.000
SCV8	STD-2H	2,5	4	4	11.500

SCV9	STD-2H	2,5	6	0	11.500
SCV10	STD-2H	2,5	6	0	14.000
UFSCV1	MBF-1H	2,5	4	4	12.000
UFSCV2	SBF-1H	2,0	4	4	12.000
UFSCV3	SBF-1H	2,5	4	4	11.000
UFSCV4	ANT-1H	2,5	4	4	10.000
UFSCV5	MBF-1H	2,5	4	4	13.000

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.4 Cálculo da Recuperação Mássica

A recuperação mássica foi determinada por meio da relação entre a massa de concentrado obtida e a massa de alimentação inicial. Para isso, após cada teste de separação magnética, o concentrado e o rejeito foram devidamente filtrados, secos e pesados. A recuperação mássica foi então calculada utilizando a equação:

$$R_m = \left(\frac{M_c}{M_a} \right) \times 100 \quad (3)$$

sendo:

- **Rm** = Recuperação mássica;
- **Mc** = Massa do concentrado;
- **Ma** = Massa da alimentação.

Esse procedimento permitiu avaliar a eficiência da separação magnética em diferentes condições operacionais, comparando os resultados entre rotas alternativas de alimentação com deslamegem e sem deslamegem.

4.5 Granulometria da Alimentação

A distribuição granulométrica das amostras foi determinada por peneiramento a úmido para as frações acima de 20 μm e com granulômetro a laser para as frações menores que 20 μm . O peneiramento permitiu a separação das partículas em diferentes faixas granulométricas, enquanto a técnica de granulômetro a laser foi utilizada para caracterizar com precisão as frações mais finas, baseando-se no princípio de sedimentação das partículas em meio líquido. Essa abordagem garantiu uma avaliação detalhada da granulometria das amostras, possibilitando uma melhor compreensão do comportamento do material durante os testes de separação magnética.

4.6 Análise Química

As análises químicas foram realizadas com o objetivo de determinar o teor de ferro (Fe) nas amostras utilizadas nos ensaios de separação magnética. Amostras da alimentação, tanto com deslamagem quanto sem deslamagem, bem como dos concentrados gerados durante os testes, foram devidamente homogeneizadas, secas e enviadas a um laboratório especializado para a realização dos ensaios. A técnica empregada foi a espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), método amplamente utilizado devido à sua precisão e eficiência na quantificação de elementos metálicos. Os resultados obtidos foram essenciais para a avaliação do desempenho dos testes, especialmente na determinação dos índices de recuperação metalúrgica e qualidade do concentrado final.

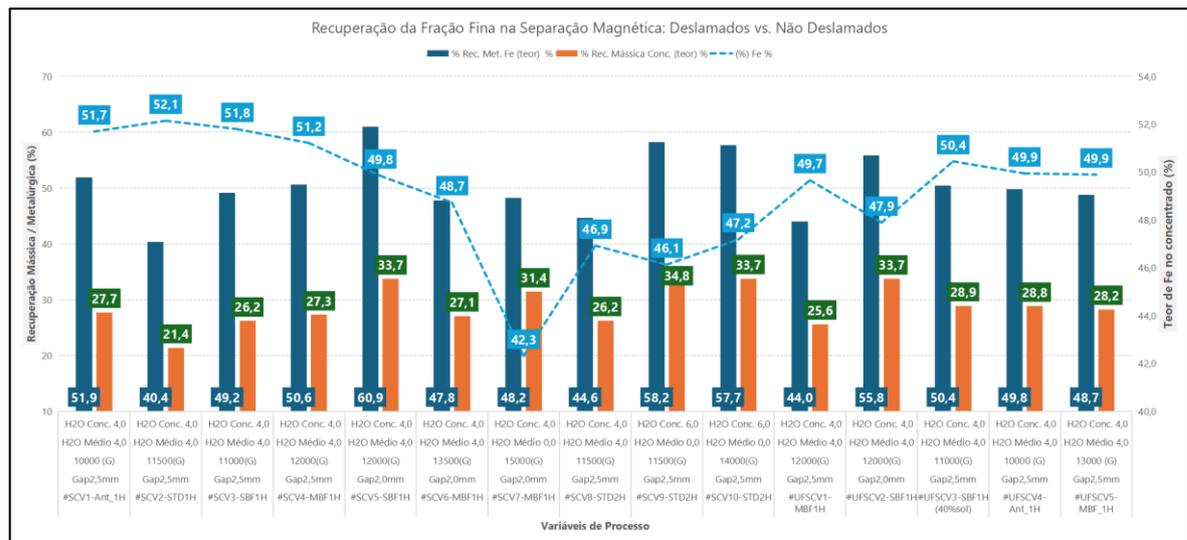
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Testes Realizados

A alimentação sem deslamagem foi testada com uma concentração de 40% de sólidos, enquanto a alimentação com deslamagem foi processada com 50% de sólidos. Para garantir uma comparação consistente, as demais variáveis operacionais foram mantidas constantes.

Os resultados dos testes foram analisados comparando a recuperação mássica, o teor de ferro no concentrado e a eficiência da separação para cada tipo de matriz magnética. A Figura 11 apresenta um comparativo entre os diferentes testes realizados, destacando as diferenças de recuperação obtidas para cada condição avaliada.

Figura 11 - Comparativo entre os testes realizados, considerando a recuperação mássica, metálica e o teor de ferro (%)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Na figura 11, o termo SCV (*Scavenger*) refere-se à alimentação do processo *Scavenger*, que não sofreu deslamagem. Já o UFSCV (*Underflow Scavenger*) refere-se à alimentação do processo *Scavenger* com deslamagem, utilizando o *underflow* (partículas mais grossas) do rejeito da etapa *Rougher*.

O cálculo da recuperação para a alimentação com deslamagem já considera a perda de material no *overflow* na deslamagem, que é de (-15,72%). Isso significa que 15,72% do material foi perdido durante o processo de deslamagem, e essa perda já está contabilizada nos resultados.

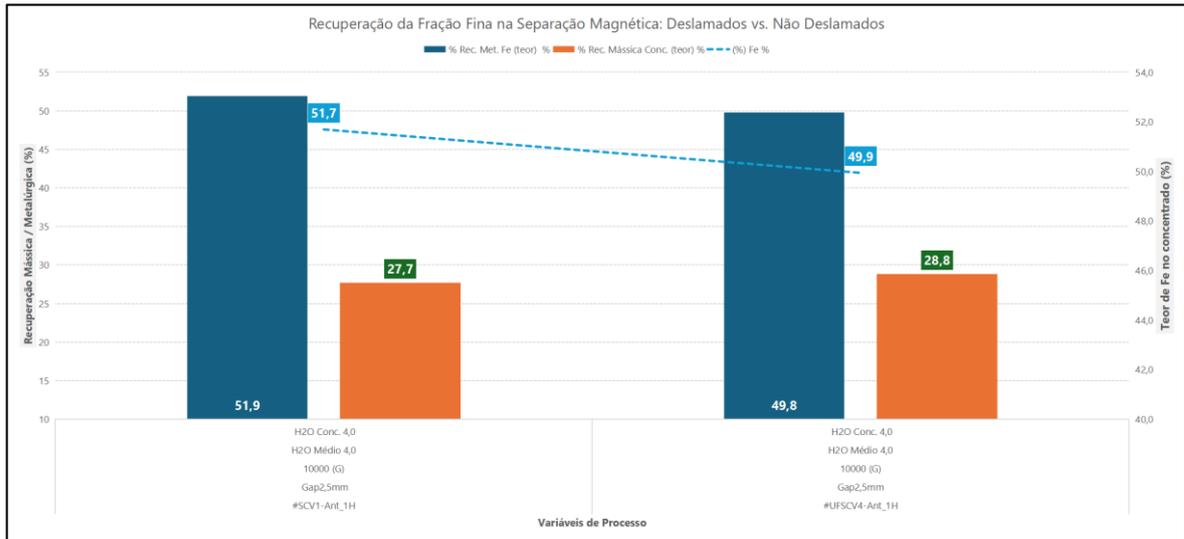
Como evidenciado na Figura 11, os testes que apresentaram os melhores resultados, considerando o teor de ferro, a recuperação mássica e a recuperação metálica, foram SCV1, SCV4 e SCV5 para a rota alternativa de alimentação sem deslamagem. Para a rota alternativa de alimentação sem deslamagem, os testes UFSCV4, UFSCV1 e UFSCV2 foram escolhidos para efeito de comparação, pois replicaram os mesmos parâmetros operacionais utilizados na alimentação sem deslamagem. Dessa forma, foi possível avaliar de forma direta o impacto da deslamagem sobre a eficiência da separação magnética, isolando a influência dessa etapa nas variáveis analisadas.

As variáveis operacionais analisadas tiveram um impacto direto na eficiência da separação magnética, determinando a recuperação do ferro e a seletividade do processo. A intensidade do campo magnético foi um dos fatores mais relevantes, pois valores maiores aumentaram a atração das partículas finas de ferro, melhorando a recuperação da fração fina. No entanto, campos magnéticos muito elevados retiveram partículas mistas, reduzindo a seletividade.

5.1.1 Comparação dos testes com melhores resultados

A Figura 12 mostra os resultados da separação magnética via WHIMS, utilizando a matriz Antiga, comparando a recuperação da fração fina na separação magnética de materiais com deslamagem e sem deslamagem.

Figura 12 - Resultado da separação magnética utilizando a matriz Antiga



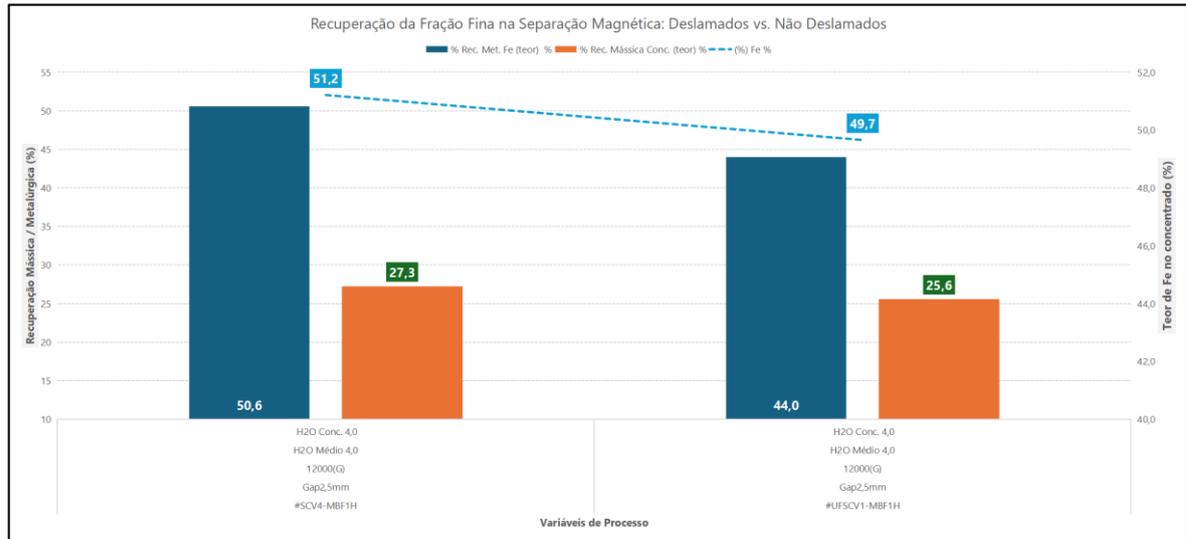
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Na matriz Antiga, observou-se que a alimentação sem deslamagem apresentou um teor de ferro no concentrado de 51,7%, com uma recuperação mássica de 27,7% e recuperação metalúrgica de 51,9%. Por outro lado, a alimentação com deslamagem resultou em um teor de ferro ligeiramente inferior (49,9%), porém com uma recuperação mássica maior, de 28,8%, e recuperação metalúrgica de 49,8%.

Embora, o teor de ferro tenha sido ligeiramente superior na alimentação sem deslamagem, a diferença de desempenho entre as duas rotas alternativas foi pequena, indicando que a utilização da deslamagem nesta matriz foi limitado. Isso se deve em parte ao fato de que a área de passagem restrita da matriz Antiga compromete o fluxo da polpa e reduz a eficiência do campo magnético, o que pode neutralizar os benefícios da remoção das lamas.

A Figura 13 apresenta os resultados da separação magnética realizada por meio do processo WHIMS, utilizando a matriz *Mega BigFLUX®*. A comparação foi feita entre a recuperação da fração fina nas duas alimentações: com deslamagem e sem deslamagem.

Figura 13 - Resultado da separação magnética utilizando a matriz *Mega BigFLUX®*



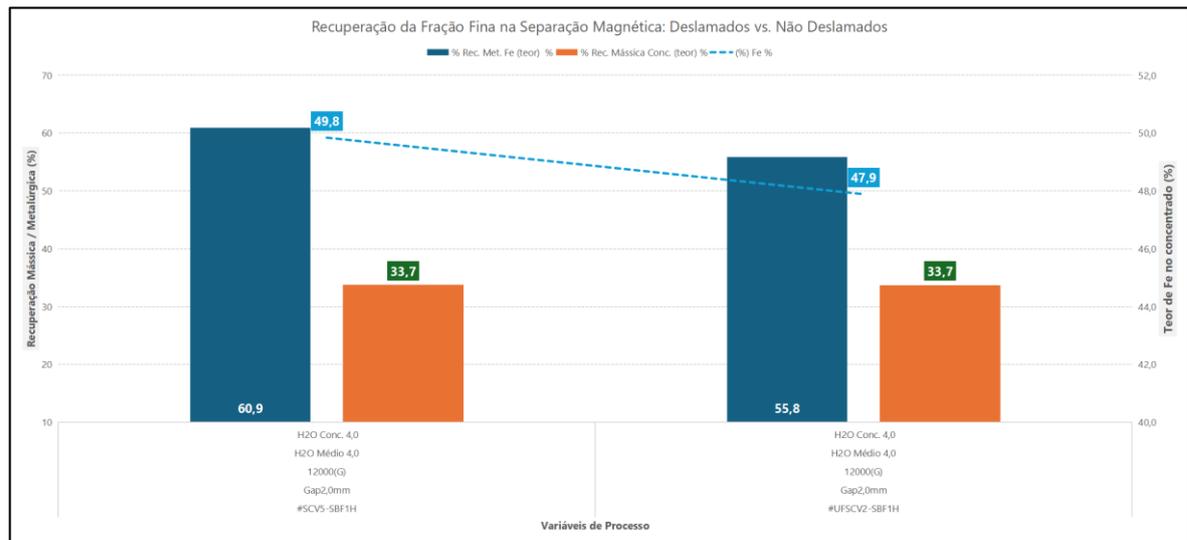
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Com a matriz *Mega BigFLUX®*, que possui uma área de passagem cinco vezes maior, os resultados foram mais definidos. A alimentação sem deslamagem apresentou um teor de ferro de 51,2%, com recuperação mássica de 27,3% e recuperação metalúrgica de 50,6%. Já a alimentação com deslamagem resultou em um teor de ferro de 49,7%, recuperação mássica de 25,6% e recuperação metalúrgica de 44,0%.

Neste caso, a presença de lamas não prejudicou o processo — pelo contrário, a condição sem deslamagem foi claramente mais eficiente. Isso demonstra que a ampliação da área de passagem melhora significativamente a fluidez da polpa, permitindo que o separador lide melhor com partículas finas sem comprometer a seletividade magnética. A deslamagem, nesse contexto, representou uma perda de rendimento global.

Por último, a Figura 14 exhibe os resultados obtidos na separação magnética de alta intensidade, utilizando a matriz *Super BigFLUX®*. O foco da comparação é a recuperação da fração fina nas duas alimentações: com deslamagem e sem deslamagem.

Figura 14 - Resultado da separação magnética utilizando a matriz *Super BigFLUX®*



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

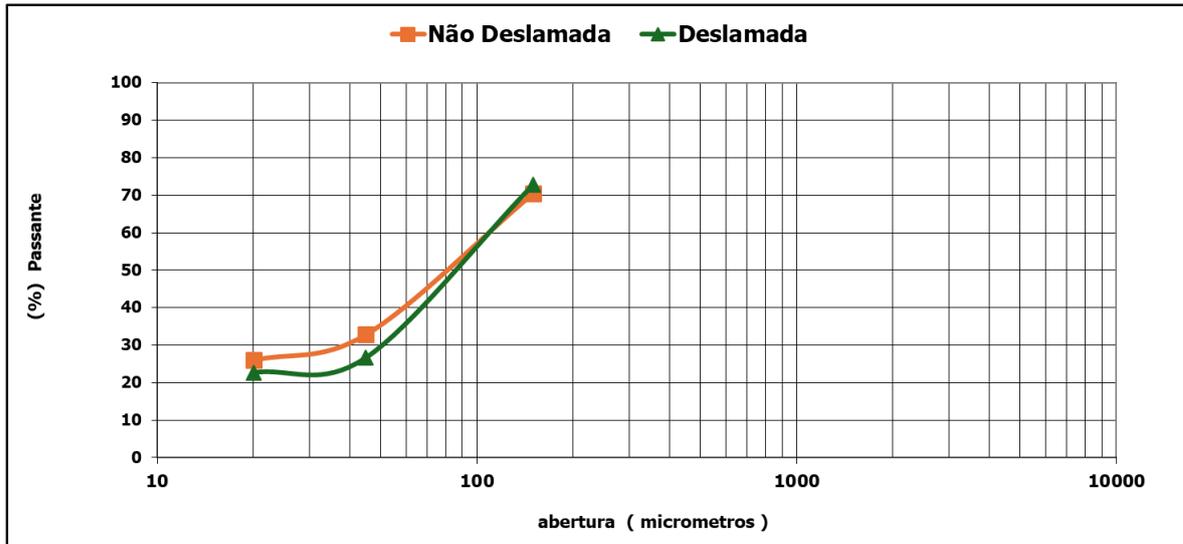
Utilizando a matriz *Super BigFLUX®*, a alimentação sem deslamagem apresentou um teor de ferro no concentrado de 49,8%, com recuperação mássica de 33,7% e recuperação metalúrgica de 60,9%. Já a alimentação com deslamagem teve um teor de 47,9%, mantendo a recuperação mássica em 33,7%, mas com recuperação metalúrgica reduzida, de 55,8%.

Esse resultado segue a mesma tendência observada com a matriz *Mega BigFLUX®*, de que a remoção das lamelas resulta em uma menor eficiência global. A maior área de passagem permite melhor aproveitamento do campo magnético mesmo com a presença de partículas finas, tornando a deslamagem uma etapa desnecessária nesse tipo de matriz.

5.2 Análise Granulométrica

O gráfico da Figura 15 ilustra o ensaio de distribuição granulométrica que foi realizado.

Figura 15 - Análise Granulométrica da Alimentação



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A análise granulométrica foi realizada para as amostras de alimentação com deslamagem e sem deslamagem, sendo os resultados expressos em porcentagem passante acumulada para diferentes faixas de malha: 150 μm , 45 μm , 20 μm e < 20 μm . Os dados revelam uma diferença considerável no comportamento das frações finas, em especial abaixo de 45 μm .

A amostram da alimentação sem deslamagem apresentou maior fração de partículas finas, com 32,86% passante abaixo de 45 μm e 26,02% abaixo de 20 μm . Já a amostra da alimentação com deslamagem apresentou 26,67% e 22,68%, respectivamente, nessas mesmas faixas, evidenciando a remoção parcial de lamas finas por meio do processo de deslamagem.

Nas faixas mais grossas (>150 μm), os percentuais passantes foram semelhantes: 70,46% para a amostra da alimentação sem deslamagem e 72,73% para a amostra da alimentação com deslamagem. Ou seja, a deslamagem não afetou substancialmente as partículas mais grossas.

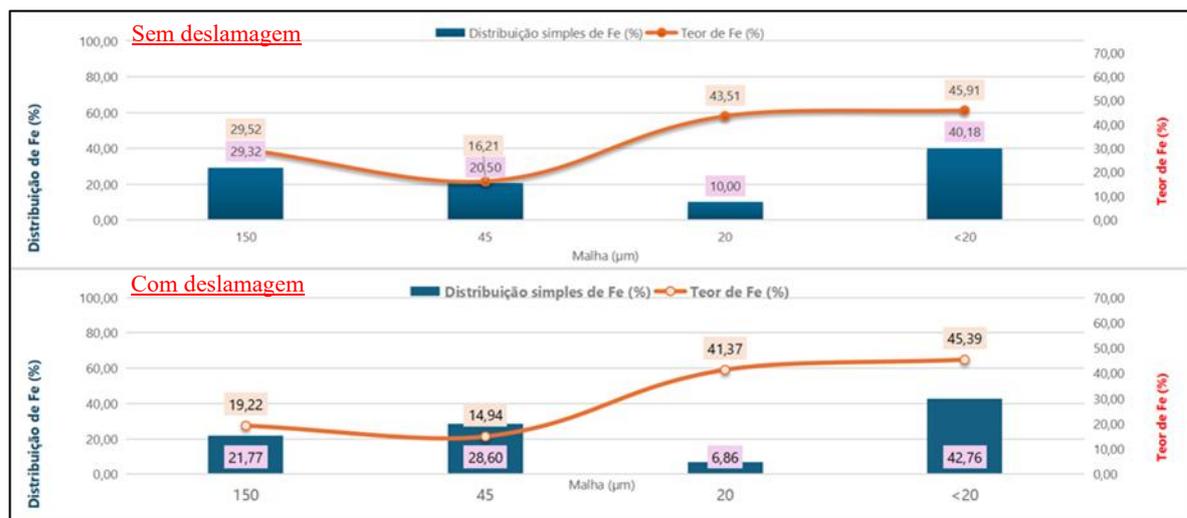
A partir da interpolação dos dados, o d_{50} , ou seja, o diâmetro em que 50% das partículas são menores que o respectivo tamanho, foi estimado:

- Amostra com alimentação com deslamagem: 92 μm
- Amostra com alimentação sem deslamagem: 83 μm

5.3 Análise Granuloquímica

A análise granuloquímica desempenha um papel fundamental na avaliação da distribuição do ferro entre as diferentes faixas granulométricas, fornecendo subsídios importantes para o entendimento da eficiência dos processos de concentração mineral. A Figura 16 apresenta os resultados da análise granuloquímica das duas rotas alternativas de alimentação.

Figura 16 - Distribuição Granuloquímica nas Alimentações com Deslamagem e Sem Deslamagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A alimentação sem deslamagem apresentou uma concentração predominante de ferro na fração <20 µm, representando 40,18% da distribuição, com teor de 45,91%. A segunda maior distribuição ocorreu na faixa de 150 µm (29,32%), porém com teor de ferro significativamente inferior (29,52%), seguido pela faixa de 45 µm com distribuição de 20,50% e teor de apenas 16,21%. A fração de 20 µm apresentou um teor de 43,51%. Esses dados indicam que, apesar da presença significativa de ferro em partículas finas, uma parcela considerável ainda está presente nas faixas grossas, embora com teor reduzido.

Na alimentação com deslamagem, a distribuição de ferro também foi majoritariamente concentrada na fração <20 µm (42,76%), com teor semelhante ao da alimentação sem deslamagem (45,39%). Contudo, as frações de 150 µm e 45 µm apresentaram redução expressiva tanto na distribuição (21,77% e 28,60%, respectivamente) quanto no teor de ferro (19,22% e 14,94%). Esse comportamento reforça a função da deslamagem como processo seletivo que prioriza a retenção das frações mais finas, removendo partículas grossas com baixo teor de ferro e, conseqüentemente, ajustando a alimentação para um perfil mais favorável à separação magnética.

Já as Figuras 17 e 18 ilustram os resultados obtidos para os concentrados gerados em cada uma das rotas, permitindo uma análise comparativa da influência da deslamagem na distribuição do ferro entre as frações granulométricas do produto final.

Figura 17 - Análise Granuloquímica do Concentrado da alimentação sem deslamagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 18 - Análise Granuloquímica do Concentrado da alimentação com deslamagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Nos concentrados gerados com a matriz Antiga verificou-se também a influência da utilização da deslamagem. Na rota alternativa sem deslamagem, a maior concentração de ferro foi observada na fração de 45 μm (46,46%), com teor de 47,92%, seguida pela fração <20 μm (25,81%) com teor de 51,69%. Já na rota alternativa com deslamagem, houve uma elevação significativa da distribuição na fração <20 μm (37,69%), acompanhada de um aumento expressivo no teor de ferro (61,18%). Isso demonstra que a matriz Antiga, embora mais limitada em termos de design, conseguiu favorecer a recuperação seletiva em frações finas após a remoção de lamas.

A matriz *Mega BigFLUX®* apresentou uma distribuição equilibrada entre as faixas granulométricas nos dois cenários. Na alimentação sem deslamagem, a maior parte do ferro concentrou-se nas faixas de 150 μm (30,57%) e 45 μm (41,10%), com teores de 44,31% e 43,50%, respectivamente. No entanto, as frações mais finas, especialmente, a de 20 μm (17,33%) e <20 μm (11,01%), apresentaram teores bastante elevados de ferro, 61,79% e 58,87%, respectivamente, indicando a boa seletividade da matriz para partículas finas liberadas. Já na alimentação com deslamagem, houve um aumento da distribuição de ferro nas faixas de

20 μm (22,51%) e <20 μm (15,59%), com teores de 61,32% e 60,33%, confirmando a eficiência da *Mega BigFLUX*® na recuperação de ferro mesmo após a remoção da fração lamelar.

Por fim, a matriz *Super BigFLUX*® também apresentou desempenho expressivo. Na alimentação sem deslamagem, a distribuição de ferro ficou, majoritariamente, concentrada na fração de 150 μm (43,93%) com teor de 46,05%. Embora, a fração <20 μm representasse apenas 10,54% da distribuição, o teor de ferro nesta faixa foi elevado (58,74%), e ainda superior na fração de 20 μm (61,09%), demonstrando alta seletividade para partículas finas. Na alimentação com deslamagem, observou-se uma mudança significativa na distribuição, com a fração <20 μm passando a representar 27,35% da massa, com teor de 60,60%, enquanto a faixa de 20 μm obteve o maior teor (61,89%). Esses resultados evidenciam que a matriz *Super BigFLUX*® foi eficiente na recuperação seletiva das frações finas, inclusive após a deslamagem.

Ao comparar os concentrados com as respectivas alimentações, observa-se que, em todos os casos, houve um ganho de teor nas frações finas. Especialmente, com a utilização das matrizes *Mega* e *Super BigFLUX*® que apresentaram melhores desempenhos na captura seletiva de partículas ricas em ferro. Por outro lado, a matriz Antiga também demonstrou resultados satisfatórios, sobretudo quando utilizada com alimentação com deslamagem, atingindo teores acima de 60% na fração <20 μm .

Essa análise evidencia que a escolha da matriz magnética, aliada ao controle da deslamagem, exerce influência direta sobre a eficiência do processo, afetando tanto a seletividade quanto a recuperação das partículas de interesse. Além disso, ressalta-se que, embora a deslamagem melhore o perfil granulométrico da alimentação, também pode remover partículas finas ricas em ferro, o que exige avaliação criteriosa para otimizar o desempenho global da planta de concentração.

6 CONCLUSÕES

A avaliação comparativa entre as rotas alternativas de concentração magnética, alimentação com deslamagem e alimentação sem deslamagem, permitiu compreender os efeitos dessa etapa sobre o desempenho do processo. Observou-se que, a alimentação sem deslamagem apresentou os melhores resultados em termos de teor de ferro no concentrado, recuperação mássica e recuperação metálica.

O teste SCV5, realizado com a matriz *Super BigFLUX*® e alimentação sem deslamagem, apresentou o melhor desempenho global, atingindo um teor de ferro de 49,8%, uma recuperação mássica de 33,7% e uma recuperação metálica de 60,9%. Esses resultados demonstram o potencial dessa matriz em promover elevada retenção de partículas finas sem comprometer a seletividade do processo.

A análise comparativa entre as matrizes magnéticas evidenciou diferenças importantes em termos de desempenho. As matrizes *Mega BigFLUX*® e a *Super BigFLUX*® apresentaram maior área ativa e melhor área de fluxo, o que favoreceu a captura seletiva de partículas finas, contribuindo para teores mais elevados e melhor recuperação. Já a matriz Antiga, obteve resultados expressivos e próximos aos das matrizes mais modernas, sobretudo quando utilizada com alimentação sem deslamagem, indicando que sua eficiência ainda é considerável em certos contextos operacionais.

A análise granuloquímica dos concentrados obtidos nos testes reforça essas conclusões. Pois, na rota alternativa sem deslamagem, a fração <20 µm obteve elevados teores de ferro, especialmente nas matrizes *Mega* e *Super BigFLUX*®. Confirmando que, a presença de finos contribui significativamente para o rendimento do processo. Por outro lado, a remoção de finos na rota de com alimentação com deslamagem reduziu a concentração de ferro nas frações mais ricas, comprometendo a recuperação metálica e a seletividade da separação.

Conclui-se, que a rota alternativa de alimentação sem deslamagem, associada a matrizes *BigFLUX*®, proporciona maior rendimento global, elimina uma etapa de processo, reduz custos e contribui para um circuito mais eficiente e sustentável. Essa configuração demonstrou ser a mais vantajosa dentro dos objetivos propostos, confirmando a importância de uma seleção

adequada dos parâmetros operacionais e do tipo de matriz utilizada nos processos de separação magnética de alta intensidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, J. F. D. F. Construção de um magnetômetro Hall para caracterização de partículas magnéticas utilizadas em ensaios imunológicos. 2009. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/PUC_RIO-1_e9554deee5b4356b420f4812b1c8900d. Acesso em: 02 nov. 2024.

BEZERRA, C. G. Caracterização de rejeitos de minério de ferro (IOT) e sua aplicação em materiais de construção. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/9756/1/880781.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2024.

CALLISTER, J. W. D.; RETWISCH, D. G. Ciências de engenharia de materiais: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 910 p.

DARDIS, G. F. Magnetic separators in mineral processing. *Mineral Processing Journal*, v. 5, n. 2, p. 101-115, 1989.

MORGAN, D. J.; BRONKALA, W. Magnetic separation: Principles and applications. *Minerals Engineering*, v. 6, n. 4, p. 367-380, 1993. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/230304409_Separation_Magnetic_Separation. Acesso em: 02 dez. 2024.

PAPINI, R. M.; FURTADO, V. M.; PAIVA, F. L. P.; TAMEIRÃO, D. R.; GOMES, A. C. F. Uma abordagem estatística da separação magnética de rejeitos de minério de ferro. In: XIV JORNADAS ARGENTINAS DE TRATAMIENTO DE MINERALES, 2018, Catamarca. Disponível em: <https://riaa-tecno.unca.edu.ar/handle/123456789/384>. Acesso em: 10 nov. 2024.

PARKER, M. J. Magnetic separation of minerals. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 15, n. 1, p. 45-60, 1977.

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 - International Engineering Journal*, Ouro Preto, v. 70, n. 3, p. 357-363, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/remi/a/mpXgYYmmjKK5j859krZbNWN/>. Acesso em: 14 nov. 2024.

RIBEIRO, J. P.; RIBEIRO, C. H. T.; VIEIRA, E. G. A nova tecnologia das matrizes magnéticas BigFLUX®. *REM - Revista Escola de Minas*, v. 75, n. 3, p. 275-278, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/x83fTB4vpTgnmfF8gVtMvBG/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 14 nov. 2024.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; GONZAGA, L. M. Separação magnética e eletrostática. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (Org.). Tratamento de Minérios. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2017. Cap. 8, p. 341-364.

SOUZA, N. A. F. Análise crítica de rotas de processamento de minérios de ferro itabiríticos. 2010. 107 f. Projeto de Graduação (Engenharia Metalúrgica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://www.monografias.poli.ufrj.br/monopoli10003574.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2024.

STENER, J. F.; CARLSON, J. E.; SAND, A.; PÅLSSON, B. I. Internal flow measurements in pilot scale wet low-intensity magnetic separation. *International Journal of Mineral Processing*, v. 155, p. 55-63, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301751616301624>. Acesso em: 21 nov. 2024.

VALÉRIO, R. M.; ABREU, F. P. V. F.; SOUZA, T. F.; LIMA, R. M. F. Caracterização de concentrado de floculação seletiva e concentração magnética de lama de minério de ferro. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 2022. Anais [...]. Disponível em: <https://publicacoes.entmme.org/2022/145493.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2024.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. J. *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 8th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016. p. 353-372. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Byambasuren_Galbadrakh/publication/301614749_Mine_ral_Processing_Technology/links/571d741008ae408367be5792/Mineral-Processing-Technology.pdf. Acesso em: 22 nov. 2024.