



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS – EM
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



LUCAS CAMARGOS DOS SANTOS AMORIM

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE REAGENTES NO DESEMPENHO DA SEPARAÇÃO
MAGNÉTICA COM TUBO DE DAVIS

Ouro Preto – MG

2025

LUCAS CAMARGOS DOS SANTOS AMORIM

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE REAGENTES NO DESEMPENHO DA SEPARAÇÃO
MAGNÉTICA COM TUBO DE DAVIS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de graduação em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof. Dra. Janine Rodrigues Figueiredo.

Ouro Preto – MG

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A524a Amorim, Lucas Camargos dos Santos.

Análise da influência de reagentes no desempenho da separação magnética com Tubo Davis. [manuscrito] / Lucas Camargos dos Santos Amorim. - 2025.

45 f.: il.: color., gráf., tab..

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. 2. Materiais - Separação magnética. 3. Reagentes químicos. 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

Lucas Camargos dos Santos Amorim

Análise da influência de reagentes no desempenho da separação magnética com Tubo de Davis

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 02 de abril de 2025.

Membros da banca

Dr^a Janine Rodrigues Figueiredo - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Flávio Luis Martins (Universidade Federal de Ouro Preto)
M.Sc. Jorge Carlos Guerrero Vargas (Universidade Federal de Ouro Preto)

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 14/04/2025



Documento assinado eletronicamente por **Janine Rodrigues Figueiredo, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/04/2025, às 13:24, 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 **0896038** e o código CRC **3523003E**.

AGRADECIMENTOS

À minha família, amigos e professores que me ajudaram ao longo dessa jornada.

RESUMO

A separação magnética é amplamente utilizada no beneficiamento de minérios de ferro, sobretudo em materiais com presença significativa de minerais com diferentes respostas magnéticas, como magnetita e hematita. Este trabalho tem como objetivo analisar a influência de diferentes reagentes químicos no desempenho da separação magnética em amostras provenientes de uma unidade de mineração, utilizando o Tubo de Davis como equipamento de laboratório. Foram conduzidos 56 ensaios experimentais, sendo dois testes de referência (sem reagente) e 54 com adição de nove reagentes distintos em três concentrações (50 g/t, 150 g/t e 300 g/t), sob dois níveis de intensidade de campo magnético (1700 Gauss e 4000 Gauss). Os testes foram realizados com amostras de 50 g, em polpa aquosa, seguindo protocolo padronizado de pesagem, preparação, separação e análise. Os resultados mostraram que, em 1700 Gauss, os reagentes não promoveram aumento nas recuperações mássica e férrica em relação ao teste de referência, embora tenha sido observada melhora na qualidade química do concentrado. Em contraste, os testes realizados com 4000 Gauss apresentaram ganhos significativos na recuperação, sendo possível selecionar três reagentes com melhor desempenho: SNF Flosperse 2505 (300 g/t), Clariant 19674 (50 g/t) e Clariant 19124 (50 g/t). O destaque foi o teste com Flosperse 2505, que apresentou simultaneamente altos índices de recuperação ($R_{Fe} = 34,4\%$; $RM = 21,0\%$) e excelente qualidade do concentrado (68,21% Fe; 3,13% SiO_2) em relação ao teste de referência. Os resultados indicam que a combinação entre reagente adequado e campo magnético de alta intensidade pode otimizar o processo, e os dados obtidos fundamentam a continuidade do estudo em escala piloto com separadores industriais do tipo MIMS.

Palavras-chave: Separação magnética. Reagentes químicos. Tubo de Davis.

ABSTRACT

Magnetic separation is widely applied in the processing of iron ores, especially in materials with a significant presence of minerals exhibiting different magnetic responses, such as magnetite and hematite. This study aims to analyze the influence of different chemical reagents on the performance of magnetic separation using Davis Tube tests on samples from a mining unit. A total of 56 experiments were conducted: two reference tests (without reagent) and 54 tests with nine different reagents at three concentrations (50 g/t, 150 g/t, and 300 g/t), under two magnetic field intensities (1700 Gauss and 4000 Gauss). Each test was performed with 50 g of sample in aqueous pulp, following a standardized protocol for weighing, preparation, separation, and analysis. Results showed that at 1700 Gauss, the reagents did not improve mass or iron recoveries compared to the reference test, although an improvement in concentrate quality was observed. In contrast, tests conducted at 4000 Gauss exhibited significant improvements in both recoveries, allowing the selection of three reagents with superior performance: SNF Flosperse 2505 (300 g/t), Clariant 19674 (50 g/t), and Clariant 19124 (50 g/t). The most notable result was obtained with Flosperse 2505, which achieved high recovery rates ($R_{Fe} = 34.4\%$; $R_M = 21.0\%$) and excellent concentrate quality (68.21% Fe; 3.13% SiO_2). These results indicate that combining a suitable reagent with a high-intensity magnetic field can optimize the separation process. The findings support the continuation of this research on a pilot scale using industrial magnetic separators such as MIMS.

Keywords: Magnetic separation. Chemical reagentes. Davis Tube.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática de um separador magnético de tambor.....	19
Figura 2 - Separador magnético de rolos	20
Figura 3 - Separador magnético de banda cruzada	21
Figura 4 - Separador magnético do tipo carrossel.....	22
Figura 5 - Tubo de Davis	23
Figura 6 - Análise Química dos ensaios realizados a 1700 Gauss (print – captura de tela)	33
Figura 7 - Análise Química dos ensaios a 4000 Gauss (print – captura de tela).....	36
Figura 8 - Relação da recuperação de massa (%) com a recuperação de ferro (%) nos testes realizados a 4000 Gauss	38
Figura 9 - Ensaios com os melhores desempenhos considerando os critérios de recuperação de ferro (RFe), recuperação mássica (RM) e qualidade química do concentrado (print – captura de tela).....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do minério de ferro (granulometria – abaixo de 100 μm).	31
Tabela 2 - Condições experimentais aplicadas nos testes de separação magnética com uso de reagentes.....	32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo geral	12
2.2 Objetivos específicos	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Fundamentos do magnetismo: permeabilidade magnética, magnetização e magnetismo	13
3.2 Propriedades Magnéticas dos Minerais	15
3.3 Métodos e Equipamentos para Separação Magnética.....	17
3.3.1 <i>Tubo de Davis</i>	22
3.4 Influência de variáveis operacionais	26
4 MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1 Planejamento experimental.....	29
4.2. Parâmetros de avaliação	30
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
6 CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

A separação magnética constitui uma das principais técnicas utilizadas no beneficiamento mineral, sendo baseada nas propriedades magnéticas dos materiais, especialmente a susceptibilidade magnética. Essa propriedade determina a resposta de minerais quando expostos a um campo magnético e, permite classificá-los em diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos. Os minerais diamagnéticos são repelidos pelo campo magnético, os minerais ferromagnéticos são fortemente atraídos e os minerais paramagnéticos são fracamente atraídos. Essa diferença de comportamento apresenta-se relevante para a separação seletiva de partículas no processamento mineral, onde as características mineralógicas e as condições do processo determinam a eficiência do método (Svoboda e Fujita, 2003).

Neste contexto, o Tubo de Davis é utilizado em estudos de separação magnética (SM) por fornecer uma avaliação precisa do desempenho de minerais magnéticos. Esse equipamento é utilizado na caracterização de materiais em laboratório, permitindo determinar a recuperação em massa e a qualidade do concentrado com diferentes intensidades de campo magnético. O Tubo Davis, projetado para operar com campo magnético de baixa intensidade, é particularmente eficiente na separação de minerais ferromagnéticos, como a magnetita. Mas também pode ser usado, ainda que com menor eficiência, na separação de minerais paramagnéticos, como a hematita. A simplicidade operacional e a capacidade de ajuste tornam-no uma ferramenta essencial para a análise de parâmetros experimentais em processos de beneficiamento (Wills e Finch, 2016).

Embora, a SM seja intrinsicamente dependente das propriedades magnéticas dos minerais, a introdução de reagentes químicos durante o processamento mineral tem demonstrado impacto significativo na eficiência e seletividade do processo. Os reagentes podem alterar a interação entre partículas minerais e o campo magnético, influenciando as propriedades de superfície ou promovendo a dispersão das partículas. A análise da influência do uso de reagentes químicos na separação de minerais paramagnéticos pode ser necessária, como por exemplo, para minérios de ferro com teor elevado de minerais de ganga. Alguns estudos indicam que o uso de reagentes possibilita otimizar processos em que a intensidade de campo magnético aplicada não é suficiente para alcançar a eficiência desejada, configurando-se como

uma estratégia promissora para a melhoria do desempenho operacional (Wills e Finch, 2016).

Paralelamente, a eficiência de separação magnética está diretamente relacionada à granulometria das partículas minerais, uma vez que a força magnética exercida sobre cada grão aumenta proporcionalmente ao seu volume. Em partículas menores, o volume reduzido resulta em menor intensidade de atração magnética, o que pode ocasionar perdas de material valioso, sobretudo em processos úmidos, onde forças hidrodinâmicas e gravitacionais competem com a força magnética. Esse comportamento decorre do fato de a força de campo depender tanto do momento magnético intrínseco quanto do tamanho da partícula; portanto, amostras com maiores dimensões são mais suscetíveis à retenção. Em vista disso, o controle granulométrico constitui um parâmetro determinante para a eficácia do processo, sendo frequentemente aliado ao uso de reagentes que reduzem efeitos indesejados, como aglomeração de partículas e perda de seletividade (Rocha, 2018).

Adicionalmente, o desempenho da SM é influenciado pelas condições do campo magnético aplicado, como intensidade e gradiente. Campos de baixa intensidade, empregados em equipamentos como o Tubo de Davis, são suficientes para a separação de minerais fortemente magnéticos, mas podem ser limitantes para partículas fracamente paramagnéticas. Nesse contexto, a introdução de reagentes se torna ainda mais relevante, pois pode melhorar a resposta dessas partículas ao campo magnético, viabilizando sua recuperação mesmo sob condições operacionais adversas (Rodrigues, 2022). A combinação de ajustes nas condições de campo com o uso de reagentes adequadas permite refinar o processo, maximizando a recuperação de ferro e minimizando os níveis de contaminantes.

Nesse sentido, o estudo de casos envolvendo o Tubo de Davis e materiais com diferentes composições mineralógicas oferece subsídios importantes para a compreensão das variáveis envolvidas. Ao integrar variáveis operacionais, como intensidade de campo, granulometria e tipo de reagente, com características intrínsecas do material, torna-se possível propor soluções que otimizem a recuperação de minerais valiosos e atendam aos requisitos de qualidade do concentrado final.

Partindo dessas premissas, o presente estudo busca responder de que modo a introdução de diferentes reagentes afeta o desempenho da separação magnética em Tubo de Davis, no que diz respeito à recuperação e à qualidade do concentrado de um minério de ferro.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Analisar a influência de diferentes reagentes no desempenho da separação magnética de uma amostra de minério de ferro utilizando o Tubo de Davis.

2.2 Objetivos específicos

Para cumprir o objetivo geral serão desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Comparar resultados sem reagente dos testes com reagentes aos realizados sem reagentes, analisando parâmetros como recuperação de massa, recuperação de ferro e nível de contaminantes (SiO_2).
- Identificar os melhores reagentes e suas dosagens com base nas análises químicas e rendimentos operacionais obtidos nos testes
- Recomendar os melhores reagentes e dosagens para escalonamento em testes piloto futuros, visando a implementação em larga escala.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fundamentos do magnetismo: permeabilidade magnética, magnetização e magnetismo

O magnetismo corresponde a uma manifestação associada à presença de campos magnéticos gerados pelo movimento de cargas elétricas ou por momentos magnéticos intrínsecos de partículas elementares. A análise dessa interação envolve propriedades de dipolos magnéticos e de correntes elétricas, bem como a forma pela qual essas configurações se combinam para produzirem linhas de campo capazes de exercerem forças em determinadas substâncias. O comportamento magnético de um material resulta da orientação e do alinhamento de momentos magnéticos internos, que podem ser influenciados pela aplicação de campos externos ou por interações entre átomos e elétrons (Rodrigues, 2022)

Os campos magnéticos podem ser produzidos por diferentes métodos. Um deles envolve a utilização de correntes elétricas constantes em condutores, em que cargas em movimento criam um campo magnético ao redor do fio. A magnitude desse campo depende da intensidade da corrente e da distância em relação ao condutor, de acordo com leis que descrevem a relação entre correntes e indução magnética. Outro método consiste no uso de ímãs permanentes, formados por materiais cujas estruturas atômicas apresentam alinhamentos espontâneos de domínios magnéticos. Esse alinhamento é mantido em condições adequadas de temperatura e de composição cristalina, de modo a gerar um campo magnético persistente sem a necessidade de alimentação elétrica (Rocha, 2018).

Há também a possibilidade de criação de campos magnéticos variáveis por meio de fenômenos de indução eletromagnética, em que mudanças no fluxo magnético de um circuito podem induzir correntes elétricas. Esses processos envolvem a interdependência entre campos elétricos e magnéticos descrita pelas equações de Maxwell, que estabelecem relações entre a variação temporal dos campos e as respostas observadas em meios materiais ou no vácuo. Essa abordagem permite a obtenção de campos magnéticos intensos de forma controlada, o que pode ser aplicado em dispositivos de separação, motores e equipamentos laboratoriais (Rodrigues, 2022).

No que concerne à permeabilidade magnética, trata-se de uma grandeza física que descreve a relação entre a indução magnética (B) e a intensidade de campo magnético (H) dentro de um meio material. Essa relação é expressa pela equação $B = \mu H$, em que μ representa a permeabilidade. No Sistema Internacional de Unidades, a permeabilidade é medida em henries por metro (H/m). Essa constante indica a capacidade de o material conduzir as linhas de fluxo magnético em seu interior e pode variar conforme a composição atômica, a temperatura e o estado de magnetização. Materiais com valores de permeabilidade maiores apresentam maior facilidade em direcionar o fluxo magnético, enquanto valores menores indicam menor interação com o campo aplicado (Rocha, 2018).

Já a susceptibilidade magnética, por sua vez, está associada à resposta de magnetização de um material diante de um campo externo. Essa característica é indicada pela razão entre a magnetização (M) e a intensidade do campo magnético (H), conforme a relação $M = \chi H$, em que χ representa a susceptibilidade. Ela não é adimensional em todas as convenções, mas costuma ser tratada como um parâmetro comparativo que reflete a variação do momento magnético resultante em função do campo. Materiais diamagnéticos, paramagnéticos ou ferromagnéticos apresentam valores distintos de χ , o que influencia o sentido e a magnitude da magnetização induzida. Em regimes diamagnéticos, a susceptibilidade apresenta valores negativos; em paramagnéticos, valores positivos de pequena escala; e em ferromagnéticos, valores positivos elevados que podem se tornar não lineares em campos intensos. A combinação entre permeabilidade e susceptibilidade auxilia na caracterização de substâncias em diferentes aplicações, permitindo estimar sua resposta magnética e prever comportamentos em processos de separação, medição e controle de propriedades físicas (Rodrigues, 2022).

Outro aspecto relevante diz respeito à magnetização, representada como resultante dos momentos magnéticos elementares em um volume material, decorrendo de interações entre átomos, elétrons e eventuais campos externos. A magnetização pode ser explicada por modelos que consideram o alinhamento ou a desorientação de momentos intrínsecos em regiões denominadas domínios magnéticos, cuja orientação contribui para a resposta global do corpo quando submetido a fontes externas de indução. O estabelecimento e a modificação desses domínios magnéticos resultam de processos microscópicos que incluem o movimento

de paredes de domínio e a rotação de vetores de magnetização, fenômenos influenciados por energia térmica, anisotropias cristalinas e intensidade do campo aplicado. Na presença de certos materiais, a magnetização pode persistir mesmo após a remoção do campo externo. Essa característica está relacionada à forma como os domínios retornam ou não às configurações originais, sendo descrita por ciclos de histerese (Rocha, 2018).

Finalmente, o magnetismo, em termos gerais, abrange o conjunto de fenômenos associados às propriedades observadas em substâncias que exibem respostas à indução e às interações magnéticas, envolvendo, por exemplo, mecanismos eletrônicos de alinhamento. Essas respostas são utilizadas em diversas etapas de identificação e separação de minérios, bem como na caracterização de partículas e suas propriedades estruturais, permitindo o controle de variáveis de processo na indústria e em pesquisas de laboratório (Rocha, 2018).

3.2 Propriedades Magnéticas dos Minerais

As propriedades magnéticas dos materiais são investigadas considerando o arranjo eletrônico, a configuração cristalina e as interações entre momentos magnéticos elementares. Esses aspectos permitem a classificação das substâncias em categorias como paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo, cada qual com características específicas de susceptibilidade magnética, comportamento dos domínios internos e resposta a variações de temperatura e campos externos (Holanda et al., 2020).

O paramagnetismo, por exemplo, caracteriza-se pela presença de íons ou átomos com pelo menos um elétron desemparelhado, o que possibilita um alinhamento parcial dos momentos magnéticos quando submetidos a um campo. Nesse regime, a susceptibilidade apresenta valores positivos e geralmente pequenos, de modo que, na ausência de campo aplicado, a orientação dos spins permanece aleatória e não há magnetização espontânea (Holanda et al., 2020). O mecanismo paramagnético é descrito por modelos que consideram a energia térmica em equilíbrio com a energia de alinhamento magnético, resultando em um balanço termodinâmico que tende a desorganizar a orientação dos dipolos conforme a temperatura se eleva. Em campos moderados, o grau de alinhamento costuma ser proporcional à intensidade de campo, ainda que existam variações associadas às características

eletrônicas do material, como orbitais d ou f parcialmente preenchidos, que contribuem para o surgimento de momentos magnéticos locais (Rocha, 2018).

Por outro lado, o ferromagnetismo ocorre quando os momentos magnéticos de determinados átomos se alinham de forma cooperativa, produzindo magnetização macroscópica mesmo na ausência de campo externo. Esse alinhamento está vinculado a interações de troca, que envolvem termos quânticos capazes de promover a orientação paralela dos spins em regiões chamadas domínios magnéticos. Cada domínio exibe uma magnetização quase uniforme, mas a soma vetorial desses domínios no estado não magnetizado pode ser nula devido à ausência de preferências direcionais globais. A aplicação de um campo externo desloca as paredes de domínio, expandindo aqueles em que a orientação é favorável em detrimento dos que se opõem ao sentido do campo (Rodrigues, 2022).

Esse processo desencadeia curvas de histerese, em que se verificam valores de magnetização residual após a retirada do campo e valores de coercividade, que definem a intensidade de campo necessária para anular a magnetização residual. Materiais ferromagnéticos apresentam susceptibilidade magnética elevada e, em geral, dependem fortemente da temperatura, existindo um ponto denominado temperatura de Curie, acima do qual o comportamento ferromagnético é substituído por características paramagnéticas. Exemplos típicos desse fenômeno incluem o ferro, o cobalto e o níquel, cujo ordenamento interno está associado a orbitais eletrônicos que permitem grande acoplamento magnético (Rocha, 2018).

No que tange ao ferrimagnetismo, este ocorre em substâncias cujas células unitárias apresentam íons ou sub-redes com momentos magnéticos não equivalentes, orientados em sentidos opostos. A resultante global não é completamente nula, pois o acoplamento antagônico de cada sub-rede não se compensa integralmente, gerando uma magnetização líquida. Esse fenômeno é observado em materiais como as ferritas, em que a presença de diferentes sítios cristalinos favorece a existência de múltiplos tipos de íons metálicos com configurações eletrônicas distintas (Holanda et al., 2020). O estudo da ferrimagnetização envolve a determinação dos valores absolutos dos momentos envolvidos e das interações de troca que regulam o alinhamento parcial em oposição. Assim como no ferromagnetismo, há domínios e possível histerese, mas as magnitudes de magnetização dependem das diferenças entre os sítios magnéticos disponíveis no cristal. A temperatura de transição, por

analogia, é denominada temperatura de Curie para a fase ferrimagnética, definindo o limite térmico no qual as correlações entre sub-redes perdem estabilidade e o material passa a exibir características paramagnéticas (Rocha, 2018).

Por fim, o antiferromagnetismo envolve uma dinâmica em que sub-redes magnéticas são equivalentes em módulo e opostas em direção, resultando em magnetização macroscópica praticamente nula no estado ideal. Nesse caso, há interações de troca que conduzem ao alinhamento antiparalelo dos momentos, o que contrasta com o paralelismo característico do ferromagnetismo. A intensidade de campo aplicada consegue alterar essa disposição, induzindo variações sutis na distribuição de spins e modificando ligeiramente o valor resultante de magnetização, ainda que o estado geral permaneça com pouca resposta se comparado aos casos ferromagnéticos (Rodrigues, 2022).

Os materiais antiferromagnéticos também apresentam um ponto crítico denominada temperatura de Néel, que marca a transição entre o regime antiferromagnético ordenado e o regime paramagnético desordenado acima desse limiar térmico. Exemplos incluem óxidos metálicos específicos e compostos de metais de transição que abrigam momentos magnéticos equivalentes, alocados em sub-redes cristalinas de simetria oposta. Mesmo que a magnetização líquida seja reduzida, há aplicações técnicas em que o caráter antiferromagnético se torna relevante, como em dispositivos spintrônicos ou em sistemas que requerem interfaces de acoplamento com fases ferromagnéticas (Holanda et al., 2020).

Vale ressaltar que os diferentes regimes de magnetismo guardam relação com a estrutura eletrônica e com as condições de empacotamento dos átomos na rede sólida, pois o grau de sobreposição orbital, as energias de troca e as distâncias interatômicas influenciam o comportamento global. A identificação de fases paramagnéticas, ferromagnéticas, ferrimagnéticas ou antiferromagnéticas demanda a realização de medições experimentais, como determinação de curva de magnetização ou medidas de susceptibilidade magnética em função da temperatura (Rocha, 2018).

3.3 Métodos e Equipamentos para Separação Magnética

Os equipamentos utilizados em processos de separação magnética podem ser classificados em dois grupos principais, de acordo com o meio no qual ocorre a

operação: a seco ou a úmido. Na separação magnética a seco, os sólidos passam pelo campo magnético sem a presença de água, o que se mostra adequado em situações em que a umidade do minério é naturalmente baixa ou quando não há disponibilidade de recursos hídricos para a lavagem e o transporte das partículas. Nesse grupo, o material é alimentado em equipamentos que utilizam correias, tambores ou rolos para movimentar o fluxo e o expor às zonas de alta ou baixa intensidade magnética, dependendo do tipo de minério a ser processado (Melo, 2016).

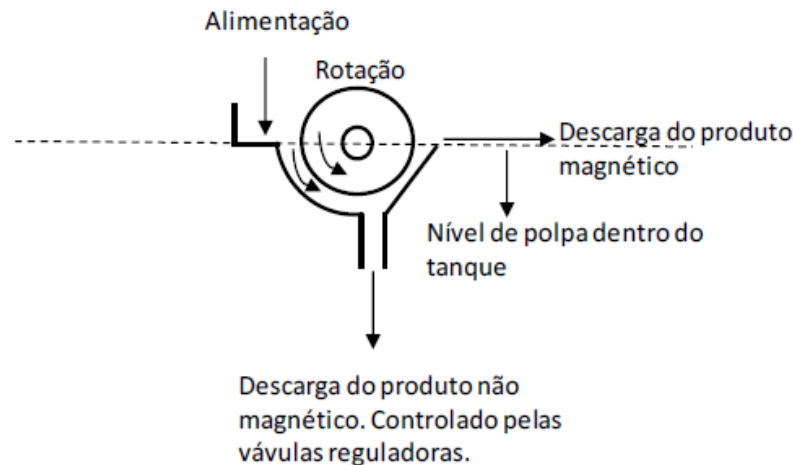
Por outro lado, a separação magnética a úmido ocorre com a formação de polpas ou suspensões, em que o minério é misturado a água, promovendo uma dispersão mais uniforme das partículas e facilitando o contato com as superfícies magnéticas ou com o campo de indução. Essa abordagem é escolhida quando se necessita de controle sobre a granulometria fina ou quando o minério contém argilas e contaminantes que requerem processo de classificação adicional (Melo, 2016).

A classificação dos separadores magnéticos também leva em conta a intensidade do campo magnético, existindo equipamentos de baixa intensidade e de alta intensidade. Os separadores de baixa intensidade possuem valores típicos de indução próximos a 0,2–0,5 tesla, sendo empregados frequentemente na concentração de minerais ferromagnéticos, como a magnetita, que apresentam elevada susceptibilidade magnética. Tais equipamentos podem operar tanto a seco quanto a úmido, dependendo das características do minério e das condições de processo. Já os separadores magnéticos de alta intensidade atingem níveis de campo que superam 1 tesla, podendo alcançar valores acima de 2 teslas em configurações especializadas. Nesse regime, a presença de gradientes pronunciados de campo magnético permite a captação de minerais paramagnéticos ou fracamente magnéticos, como a hematita, a goethita e a siderita. A seleção entre baixa ou alta intensidade depende do tipo de mineral-alvo, da natureza dos contaminantes e do desempenho desejado em termos de recuperação ou pureza do concentrado (Luz; Sampaio; França, 2010).

Em termos de configurações, o separador de tambor (Figura 1) é uma das mais empregadas, sendo este um cilindro revestido de material não magnético que gira ao redor de conjuntos de ímãs internos ou de eletroímãs que geram a região de campo. O minério é alimentado na parte externa do tambor, e as partículas de maior susceptibilidade são atraídas para a superfície, deslocando-se ao longo do cilindro até

serem removidas em pontos específicos, enquanto as partículas não magnéticas caem por gravidade em outra descarga (Luz; Sampaio; França, 2010).

Figura 1 - Representação esquemática de um separador magnético de tambor.

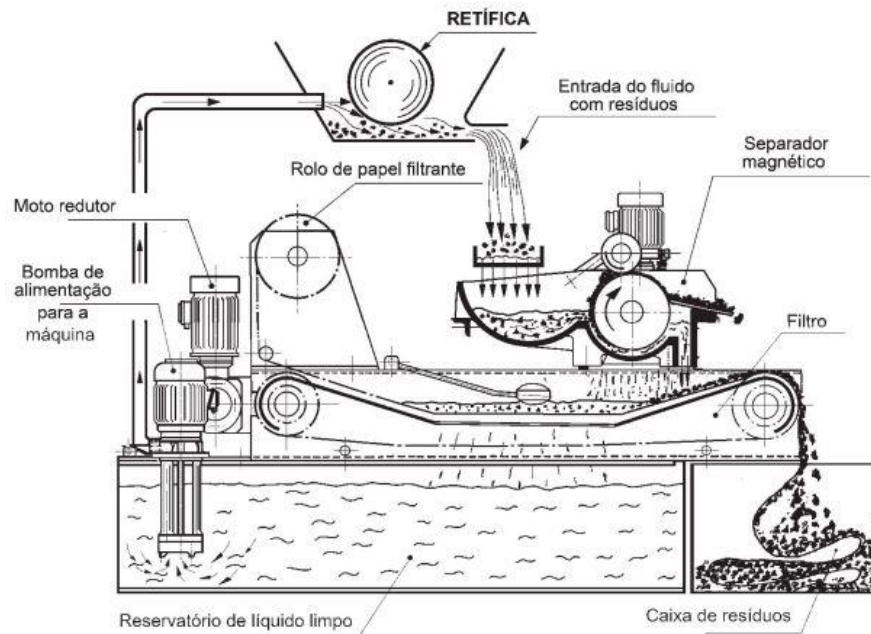


Fonte: Melo (2016, p. 20).

O fator que define a eficiência está relacionado ao ajuste da velocidade de rotação, à intensidade de campo e à posição dos ímãs no interior do tambor. Alguns equipamentos contam com sistemas de ajuste do ângulo magnético, possibilitando o controle das zonas de coleta e de limpeza do concentrado. Na operação a úmido, o tambor permanece parcialmente submerso em um tanque que conduz a polpa de minério, permitindo separações com granulometrias mais finas e com menor risco de empastamento (Melo, 2016).

Outro exemplo é o separador de rolos (Figura 2) induzidos que funciona por meio de um cilindro recoberto por material de alta permeabilidade e ímãs potentes ou eletroímãs. Conforme o rolamento gira, o campo magnético induzido na carcaça ou nos elementos magnéticos atrai as partículas suscetíveis, que são levadas ao longo do percurso até serem retiradas por forças mecânicas ou pela diminuição abrupta do campo no final do rolo (Melo, 2016).

Figura 2 - Separador magnético de rolos

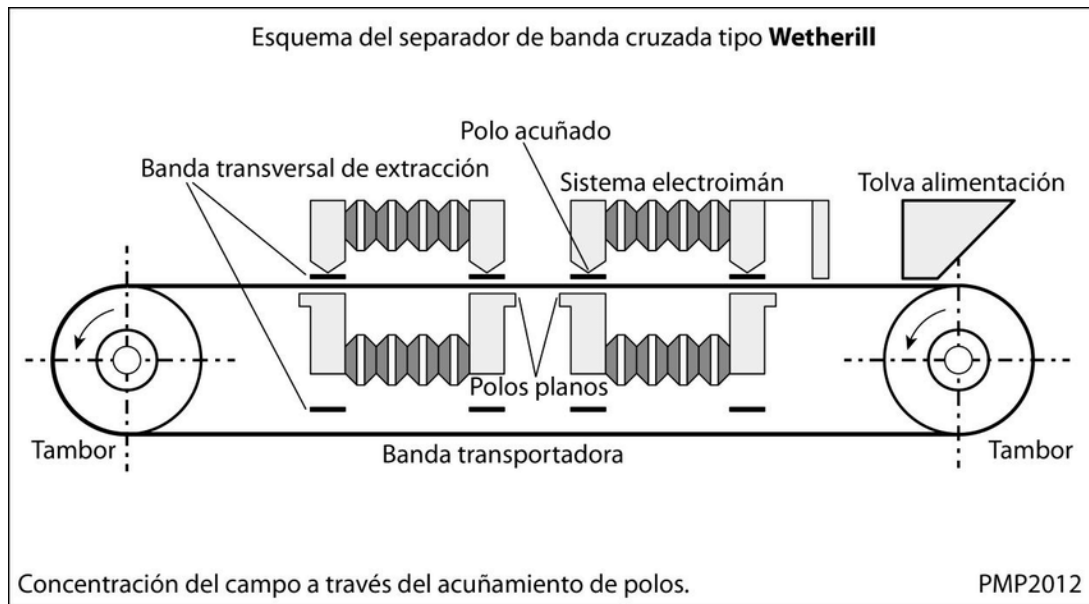


Fonte: TEXIUS, 2025.

É possível encontrar configurações de múltiplos rolos em série, permitindo operações de limpeza para a elevação dos teores de concentrado ou a redução de impurezas. Por trabalhar em condições de alta intensidade, os separadores de rolos induzidos são utilizados em minérios que contêm minerais de susceptibilidade intermediária, os quais não são facilmente separados em equipamentos de baixa intensidade. A alimentação do sistema pode ocorrer a seco, dependendo das características físicas do minério e do nível de umidade tolerado pelo processo (Rocha, 2018).

É relevante mencionar também o separador magnético de correias cruzadas (Figura 3), conhecido como *cross belt*, que se baseia em um arranjo de correia transportadora que atravessa perpendicularmente o campo gerado por ímãs permanentes ou eletroímãs. Conforme as partículas passam pela zona de influência do campo, aquelas que apresentarem susceptibilidade magnética suficiente são desviadas e coletadas em pontos específicos da correia, enquanto as restantes seguem o fluxo normal e são descartadas (Melo, 2016).

Figura 3 - Separador magnético de banda cruzada

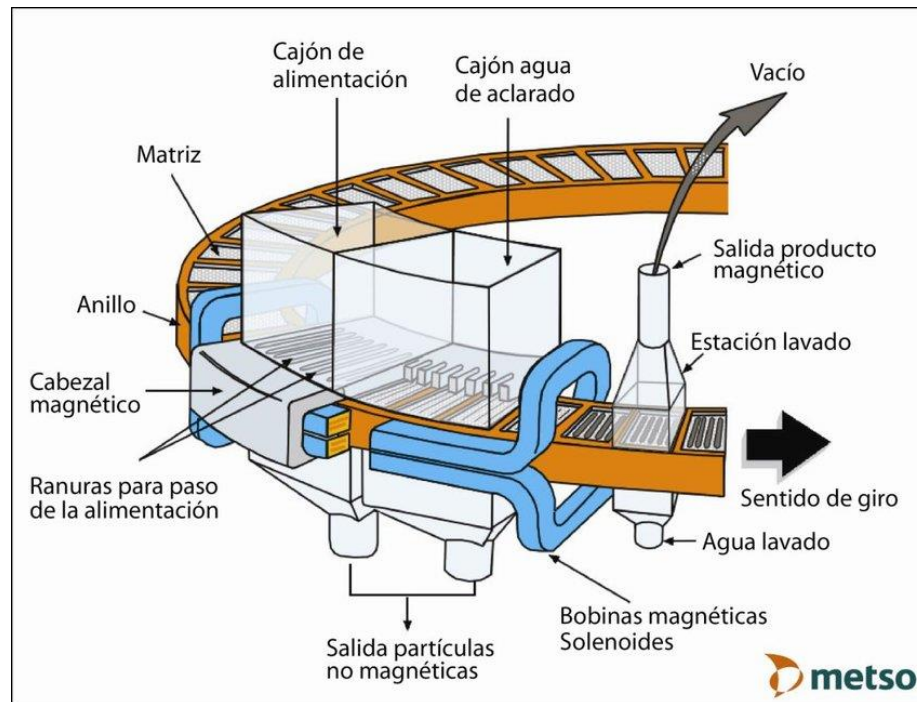


Fonte: *Research Gate*, 2025.

Esse tipo de equipamento costuma ser utilizado em regimes de baixa ou média intensidade, conforme o tipo de ímã empregado, e pode ser integrado a processos de pré-concentração em larga escala, tendo em vista a simplicidade de operação e a continuidade do fluxo (Melo, 2016).

Tem-se ainda os separadores magnéticos do tipo carrossel (Figura 4), mais presentes em processos a úmido. Eles apresentam um conjunto de compartimentos que giram em torno de um eixo vertical e passam por zonas de campo intenso.

Figura 4 - Separador magnético do tipo carrossel



Fonte: Research Gate, 2025.

As partículas que contêm propriedades magnéticas ficam retidas nos elementos de coleta, sendo lavadas sucessivamente à medida que o carrossel gira e passa por estágios de lavagem e descarga. Essa lógica permite um tratamento de grandes volumes de polpa, com a possibilidade de múltiplas etapas de limpeza ou concentração, dependendo do *design* do equipamento (Luz; Sampaio; França, 2010).

3.3.1 Tubo de Davis

O Tubo de Davis (Figura 5) consiste em um equipamento de laboratório voltado para avaliar a viabilidade e o desempenho da separação magnética em escala reduzida, auxiliando no entendimento do comportamento de amostras minerais em condições úmidas de campo magnético. A concepção original inclui um sistema capaz de simular, em menor escala, processos que seriam realizados em separadores industriais, sobretudo de baixa intensidade, embora existam variações capazes de emular diferentes intensidades de campo. O objetivo principal é determinar a fração magnética de uma amostra de minério e estabelecer parâmetros preliminares de concentração, avaliando o potencial de recuperação de minerais ferromagnéticos ou paramagnéticos com suscetibilidade suficiente para serem retidos. A análise dos

resultados permite indicar a distribuição de fases e direcionar ajustes nas etapas de concentração magnética, fornecendo subsídios para o projeto e a otimização de processos em plantas de beneficiamento (Zanuelo, 2022).

Figura 5 - Tubo de Davis



Fonte: Polimin, 2025.

O princípio de funcionamento do Tubo de Davis baseia-se na passagem de uma polpa de minério, preparada em concentrações e granulometrias específicas, por dentro de um tubo de vidro ou de material não magnético posicionado vertical ou levemente inclinado em relação ao plano horizontal. Esse tubo atravessa uma região de campo magnético controlado, cujo valor de indução pode ser ajustado por ímãs permanentes ou eletroímãs, dependendo do modelo utilizado e do intervalo de intensidade desejado. Durante a operação, a polpa é alimentada de forma contínua ou em batelada, mantendo um fluxo de água que auxilia no arraste das partículas menos suscetíveis, enquanto aquelas com maior susceptibilidade são atraídas para a região de campo e retidas na parede interna do tubo ou em pontos específicos do caminho por onde escoar a polpa. Esse funcionamento decorre de um balanceamento entre as forças hidrodinâmicas exercidas pela corrente de água, a ação gravitacional e as forças de atração magnética resultantes da interação das partículas com a região de maior intensidade de campo (Zanuelo, 2022).

Os componentes principais do Tubo de Davis incluem a carcaça ou estrutura de suporte, na qual se fixam o tubo e o sistema de geração de campo magnético, além

de uma fonte de água controlada para manter a vazão e a velocidade de fluxo adequadas. O tubo geralmente possui dimensões padronizadas em diâmetro e comprimento, de modo que os resultados obtidos em diferentes laboratórios possam ser comparados, respeitando os protocolos de teste estabelecidos. O conjunto gerador de campo pode incorporar um ímã permanente, com polaridade ajustada para manter a linha de fluxo magnético atravessando a região crítica do tubo, ou ainda um eletroímã, que permite variações na intensidade de campo conforme a corrente elétrica aplicada às bobinas. No caso de utilização de eletroímãs, podem-se explorar faixas mais amplas de intensidade, o que viabiliza a realização de ensaios comparativos para minerais de diferentes classes de susceptibilidade magnética. A estrutura completa prevê pontos de coleta do material magnético retido e do material não magnético, proporcionando a pesagem e subsequente quantificação das frações para obtenção de índices de recuperação ou de teor metálico (Assis, 2019).

O procedimento de operação envolve a preparação prévia da amostra, que é moída e classificada de acordo com o tamanho de partícula especificado para o ensaio. Em seguida, a amostra é diluída em água para formar uma polpa de densidade controlada, garantindo fluidez e evitando entupimentos no interior do tubo. O ensaio pode ser conduzido de maneira incremental, introduzindo a polpa gradualmente, de modo a permitir que o fluxo d'água exerça a força de arraste nas partículas com menor interação magnética, que são carregadas para o descarte. Simultaneamente, as partículas suscetíveis ficam aderidas ou concentradas na zona do campo, formando um leito ou camada que permanece retida até a conclusão do teste. Após determinada vazão ou tempo de operação, interrompe-se a alimentação de polpa, e a água de lavagem continua a fluir por um curto período para remover impurezas residuais ou partículas de baixa susceptibilidade que eventualmente aderiram ao aglomerado magnético. O material retido é coletado, seco e pesado, permitindo calcular a fração magnética em relação à massa total alimentada, bem como analisar características químicas e/ou mineralógicas por meio de técnicas analíticas complementares (Zanuelo, 2022).

Uma aplicação recorrente do Tubo de Davis está no estudo de minérios de ferro, em especial na caracterização de amostras contendo magnetita ou hematita, com o intuito de verificar o potencial de separação e estimar o teor de ferro recuperável em processos magnéticos de baixa ou média intensidade. Em certos casos, a

hematita pode exigir campos de intensidade maior, mas ainda se realiza a avaliação preliminar no Tubo de Davis para inferir a viabilidade da concentração. Ademais, esse equipamento é utilizado para avaliar variações mineralógicas ao longo de diferentes lotes de minério, auxiliando no ajuste de parâmetros operacionais, como a diluição da polpa, a rotação do tambor na unidade industrial e a intensidade de campo aplicada. Tais informações são fundamentais na definição de métodos de beneficiamento de minérios que possam atender aos requisitos de pureza ou de recuperação especificados para cada produto. Além de minérios de ferro, há registros de aplicação do Tubo de Davis no estudo de outros minerais paramagnéticos, embora seja mais frequente em programas geometalúrgicos e laboratoriais relacionados à exploração de jazidas ferríferas (Assis, 2019).

Os benefícios da utilização desse equipamento em laboratório incluem a simplicidade de operação, a redução de custos com testes de bancada e a capacidade de gerar dados correlacionados aos processos em escala industrial. Dessa forma, é possível, ainda na fase de pesquisa ou de avaliação de viabilidade econômica, identificar se o minério apresenta características que justificam a adoção de uma rota de concentração magnética (Assis, 2019; Zanuelo, 2022).

A precisão dos resultados obtidos em um ensaio com Tubo de Davis depende do controle rigoroso das variáveis de teste, incluindo a estabilização da intensidade de campo, a homogeneidade da polpa e a repetição dos ensaios em condições reproduzíveis. Em adição, a calibração prévia do dispositivo e a análise mineralógica detalhada da fração magnética e não magnética são aspectos que corroboram a confiabilidade dos dados. Ao correlacionar essas informações com análises químicas, torna-se possível estimar a eficiência na recuperação do componente de interesse e as perdas no rejeito, favorecendo a tomada de decisão em projetos de beneficiamento. Em contrapartida, é preciso considerar que ensaios em escala de laboratório podem não refletir integralmente as condições de operação industrial, de modo que os resultados do Tubo de Davis servem, principalmente, como indicativos das tendências de concentração magnética e das potenciais rotas de beneficiamento (Assis, 2019).

3.4 Influência de variáveis operacionais

A eficiência da separação magnética de baixa intensidade depende de variáveis operacionais que interagem de maneira a determinar a fração de material retido e a qualidade do concentrado. Uma dessas variáveis é a granulometria das partículas, pois a dimensão dos grãos exerce influência direta no contato com o campo magnético e na possibilidade de arraste por fluxo de água ou por forças mecânicas no sistema. Partículas muito grossas apresentam maior inércia e podem atravessar a zona de separação sem aderir à superfície magnética, sobretudo se o campo aplicado não for suficientemente intenso para sobrepor as forças de gravidade e de fluxo (Zanuelo, 2022).

Já partículas extremamente finas tendem a formar dispersões que, em alguns casos, dificultam a aproximação dos grãos ao campo devido à presença de turbulências, forças hidrodinâmicas e possíveis interações eletrostáticas. O dimensionamento granulométrico do minério é realizado com base em análises que visam equilibrar a probabilidade de as partículas magnéticas serem capturadas com a taxa de passagem do material. Em geral, a operação de moagem e classificação precede a alimentação no separador, garantindo intervalos de tamanho apropriados para maximizar a recuperação de minerais de interesse (Melo, 2016).

Outra variável relevante envolve a porcentagem de sólidos na polpa de alimentação, fator que reflete a relação entre a quantidade de mineral e a água no sistema. Em condições de baixa porcentagem de sólidos, a polpa encontra-se mais diluída, o que favorece a dispersão das partículas e pode ampliar a exposição destas ao campo. Nesse cenário, há menor risco de sedimentação ou aglomeração indesejada, embora a vazão de água seja maior e possa levar a perdas de partículas que, apesar de apresentarem suscetibilidade magnética, não tenham tempo suficiente para serem capturadas pela zona de campo. Por outro lado, quando a polpa está mais concentrada em sólidos, o volume de água é reduzido, o que tende a promover maior contato entre partículas e o campo, mas com maior tendência de formação de aglomerados ou sedimentação, que prejudica a separação. O ajuste ideal desse parâmetro é definido por testes de bancada, como será exemplificado na seção de Resultados, e pela correlação com a natureza do minério, de modo a equilibrar a fluidez necessária com a taxa de recuperação almejada. Nas plantas de

beneficiamento, o controle da densidade de polpa é feito por medidores e sistemas de dosagem de água, assegurando constância ao longo da operação (Melo, 2016).

O nível de polpa no tanque de separação é outro aspecto que, em conjunto com a vazão de alimentação, estabelece a dinâmica interna do equipamento. Nos separadores de tambor ou carrossel a úmido, por exemplo, esse nível influencia a profundidade da zona de campo na qual as partículas podem ser retidas. Se o nível estiver muito baixo, a ação magnética ocorre em uma região limitada, reduzindo a capacidade de concentração. Além disso, a interface entre a polpa e o ar pode gerar turbulências adicionais se houver exposição excessiva, dificultando o fluxo homogêneo (Rodrigues, 2022).

Por outro lado, níveis demasiadamente altos geram sobrecarga de polpa, limitando a região de circulação de água de lavagem e elevando a probabilidade de arraste de finos que deveriam ter sido retidos. O ajuste adequado do nível, combinado ao regime de alimentação e à intensidade de campo, permite que as partículas suscetíveis sejam capturadas de maneira eficiente, enquanto as não magnéticas saem do tanque pelo transbordo ou por canais de descarte (Rodrigues, 2022).

Os reagentes empregados na separação magnética também exercem papel determinante no desempenho do processo, embora seu uso seja mais frequente em aplicações de alta intensidade ou em casos em que seja necessário modificar as propriedades superficiais do minério. Em separadores de baixa intensidade, a utilização de reagentes, como dispersantes, floculantes ou substâncias que alteram a química do meio, pode auxiliar na mitigação de aglomerações e na redução de interações adversas entre partículas. Alguns dispersantes previnem a aderência de grãos finos a partículas maiores, mantendo uma distribuição uniforme no tanque e proporcionando maior probabilidade de contato com o campo magnético. Os floculantes, por outro lado, podem ser aplicados em circunstâncias específicas, em que a formação de flocos facilite a remoção de contaminantes ou promova a concentração seletiva do mineral magnético. A escolha e a dosagem desses compostos obedecem a estudos de laboratório que avaliam a resposta do minério em diferentes faixas de pH, buscando equilibrar a cinética de separação com a possível geração de resíduos químicos (Melo, 2016).

Adicionalmente a esses reagentes tradicionais, em determinadas operações acrescentam-se condicionadores de pH para alterar a carga superficial das partículas e melhorar a estabilidade da polpa. O controle de pH pode afetar diretamente a superfície dos grãos, mudando a carga líquida e influenciando a formação de pontes de hidrogênio ou a interação com íons presentes na água. Em alguns casos, a injeção de reagentes tem caráter corretivo, quando se deseja compensar uma condição natural do minério ou da água de processo que prejudica a concentração (Holanda et al., 2020).

O balanço de massa e o grau de liberação dos minerais também condicionam a estratégia de controle dessas variáveis. A ausência de liberação adequada pode impedir que os minerais magnéticos sejam expostos de maneira integral ao campo, retraindo partículas heterogêneas ou incompletamente moídas. Os controles de vazão de água de lavagem e de descarte de rejeito devem ser igualmente estabelecidos de modo a manter a estabilidade do leito ou camada de partículas magnéticas retidas. Se o regime hidráulico não for consistente, mesmo partículas de alta susceptibilidade podem ser arrastadas pelo fluxo, reduzindo a taxa de recuperação (Holanda et al., 2020).

Em escala industrial, os parâmetros supracitados são controlados por sistemas de automação, como: instrumentação de medição de densidade de polpa, sensores de nível e registros de adição de reagentes. A otimização contínua exige a análise de indicadores de performance, como teor de ferro no concentrado ou teor de impurezas.

Por fim, o processo deve ser encarado de maneira sistêmica, pois alterações em um ponto podem repercutir em outro. A redução excessiva da granulometria, por exemplo, pode melhorar a exposição dos minerais magnéticos, mas aumentar a instabilidade do sistema devido à elevação de finos. Da mesma forma, elevar a porcentagem de sólidos diminui o consumo de água, porém pode prejudicar a eficiência de coleta ao promover sedimentações indesejadas (Holanda et al., 2020).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido em parceria com a *Empresa XYZ* (nome fictício para preservar a sua identidade, cumprindo os parâmetros éticos), com o objetivo de avaliar a influência da adição de reagentes químicos no desempenho da separação magnética, utilizando o equipamento Tubo de Davis como método de caracterização em escala laboratorial. As amostras analisadas são provenientes de minério de ferro de uma unidade de mineração com composição média inicial de 62,9% de ferro (Fe) e 8,3% de sílica (SiO_2), conforme relatório técnico disponibilizado pela empresa.

4.1 Planejamento experimental

O planejamento das atividades foi distribuído ao longo de quatro meses, conforme cronograma operacional. No mês de maio de 2024, foram realizadas as etapas de preparação experimental, que consistiram no quarteamento das amostras brutas, divisão homogênea dos lotes, pesagem das alíquotas e preparo dos reagentes nas concentrações estabelecidas para os testes. Todas as amostras utilizadas nos ensaios foram padronizadas com massa de 50 g para garantir a uniformidade dos resultados. As concentrações de reagentes foram ajustadas para 50 g/t, 150 g/t e 300 g/t em função da massa de cada amostra, com diluição em meio líquido conforme as recomendações técnicas de cada fabricante.

Durante os meses de junho e julho de 2024, foram realizados todos os 56 ensaios laboratoriais. Os testes foram conduzidos utilizando o Tubo de Davis. Para cada reagente foram realizados seis testes, combinando dois níveis de intensidade de campo magnético (1700 Gauss e 4000 Gauss) com três diferentes concentrações de reagente (50 g/t, 150 g/t e 300 g/t), totalizando 54 ensaios com reagentes. Além disso, foram realizados dois testes de referência (sem adição de reagentes), um para cada intensidade de campo, totalizando, portanto, 56 experimentos.

Foram avaliados nove diferentes reagentes, sendo eles:

- Flosperse 3000,
- Flosperse 3000A,
- Flosperse DP/SSU 2505,

- Clariant 19674,
- Clariant 19124,
- Clariant 19259,
- Clariant 19222,
- Clariant 19675,
- Clariant 19170.

Cada ensaio foi realizado individualmente, obedecendo às mesmas condições operacionais, tempo de exposição ao campo magnético, granulometria (fração abaixo de 100 μm) e massa total de alimentação. Após a separação, os produtos foram coletados, secos em estufa a temperatura controlada, pesados e armazenados para posterior envio à análise química.

4.2. Parâmetros de avaliação

Os parâmetros adotados para avaliação do desempenho dos ensaios foram:

- Teor de Ferro (%) e Teor de Sílica (%) no concentrado: como indicadores da qualidade química do produto;
- Recuperação de Ferro (RFe): proporção do ferro presente na alimentação que foi efetivamente recuperada no concentrado;
- Recuperação Mássica (RM): proporção da massa total alimentada que foi retida no concentrado após a separação magnética.

A seleção dos melhores reagentes e condições foi baseada na maximização simultânea de RFe e RM, com consideração secundária à qualidade do concentrado, especialmente o teor de sílica. Os dados foram organizados em planilhas comparativas, analisados graficamente e discutidos com base na literatura técnica especializada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras de minério de ferro utilizadas nos ensaios foram oriundas de uma unidade de mineração, apresentando, teor médio de 62,9% de ferro (Fe), 8,3% de sílica (SiO₂) e recuperação de massa industrial de 9,9%, conforme descrito em relatório técnico da empresa, e observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Características do minério de ferro (granulometria – abaixo de 100 µm)

Condição do Material	Teor de Fe (%)	Teor de SiO ₂ (%)	Recuperação de Massa (%)
Condição Original	62,9	8,3	9,9
Sem Reagente – 1700 Gauss	64,7	5,65	18,73
Sem Reagente – 4000 Gauss	67,39	2,66	7,5

Fonte: autoria própria.

Como verificado, foram inicialmente realizados dois testes de referência no tubo de Davis, ambos sem adição de reagentes, com aplicação de campos magnéticos de 1700 e 4000 Gauss. No teste com campo de 1700 Gauss, o concentrado apresentou teor de ferro de 64,7%, teor de sílica de 5,65% e recuperação de massa de 18,73%. Este resultado representa uma melhoria significativa em relação à condição original, especialmente na recuperação mássica, que se mostrou aproximadamente o dobro do valor praticado na condição original.

Por outro lado, o teste com campo magnético de 4000 Gauss resultou em um concentrado com teor de ferro de 67,39%, teor de sílica de 2,66% e recuperação de massa de 7,5%. Apesar da menor recuperação mássica em comparação ao campo de 1700 Gauss, observou-se maior concentração de ferro e menor presença de contaminantes.

De forma geral, os resultados dos testes de referência demonstram um comportamento inversamente proporcional entre a recuperação mássica e a qualidade do concentrado. No entanto, é importante mencionar que, nos testes com adição de reagentes sob campo magnético de 1700 Gauss, houve uma redução acentuada na recuperação de massa, inviabilizando a continuação desses ensaios nesta condição, uma vez que o objetivo principal da pesquisa seria a maximização conjunta da recuperação mássica e férrica.

Conforme mencionado na Metodologia, foram empregados nove reagentes distintos nos ensaios, e que estão listados na Tabela 2. Inicialmente, foram realizados dois testes de referência (sem adição de reagentes) com aplicação de campos magnéticos de 1700 Gauss e 4000 Gauss. Em seguida, cada reagente foi testado em seis condições distintas, resultantes da combinação de dois níveis de intensidade de campo magnético (1700 e 4000 Gauss) com três concentrações distintas: 50 g/t, 150 g/t e 300 g/t. Dessa forma, cada reagente foi submetido a seis ensaios, totalizando 54 testes com reagentes, além dos dois testes de referência, perfazendo um total de 56 experimentos.

Tabela 2 - Condições experimentais aplicadas nos testes de separação magnética com uso de reagentes

Tipo de Teste	Reagente	Campo Magnético (Gauss)	Concentração (g/t)	Número de Testes
Testes de Referência	—	1700 / 4000	—	2
Testes com Reagentes	Florseperse 3000	1700 / 4000	50 / 150 / 300	6
	Florseperse 3000 ^a	1700 / 4000	50 / 150 / 300	6
	Florseperse DP/SSU 2505	1700 / 4000	50 / 150 / 300	6
	Clariant 19674	1700 / 4000	50 / 150 / 300	6
	Clariant 19124	1700 / 4000	50 / 150 / 300	6
	Clariant 19259	1700 / 4000	50 / 150 / 300	6
	Clariant 19222	1700 / 4000	50 / 150 / 300	6
	Clariant 19675	1700 / 4000	50 / 150 / 300	6
	Clariant 19170	1700 / 4000	50 / 150 / 300	6
Total Geral	—	—	—	56

Fonte: autoria própria.

A tabela de análise química expressa na Figura 6 correspondem aos testes realizados sob aplicação de campo magnético de baixa intensidade (1700 Gauss). Vale ressaltar que a alimentação utilizada em todos os ensaios foi padronizada com teor de 41,44% de ferro (Fe) e 34,10% de sílica (SiO₂) – condição original direto da mina.

Figura 6 - Análise Química dos ensaios realizados a 1700 Gauss (print – captura de tela)

Sample		Feed		Concentrate		Tailings		Results	
		Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	RFe	RM
1	Test 11 - 1700 GAUSS	41.44	34.10	64.47	5.65	36.28	40.80	29.09%	18.73%
2	Test 2 - 1700 GAUSS Flosperse 2505 - 50g/ton	41.44	34.10	68.04	3.96	38.50	36.90	15.0%	9.1%
3	Test 3 - 1700 GAUSS Flosperse 2505 - 150g/ton	41.44	34.10	67.71	1.45	39.52	37.20	12.9%	7.9%
4	Test 4 - 1700 GAUSS Flosperse 2505 - 300g/ton	41.44	34.10	68.11	2.42	37.98	37.10	16.3%	9.8%
5	Test 8 - 1700 GAUSS Flosperse 3000 - 50g/ton	41.44	34.10	70.38	1.77	38.43	38.60	18.9%	11.2%
6	Test 9 - 1700 GAUSS Flosperse 3000 - 150g/ton	41.44	34.10	70.10	1.61	40.28	37.20	12.0%	7.2%
7	Test 10 - 1700 GAUSS Flosperse 3000 - 300g/ton	41.44	34.10	62.94	7.23	40.75	35.40	6.1%	4.0%
8	Test 14 - 1700 GAUSS Flosperse 3000A - 50g/ton	41.44	34.10	69.53	2.54	38.42	38.00	17.4%	10.4%
9	Test 15 - 1700 GAUSS Flosperse 3000A - 150g/ton	41.44	34.10	69.53	2.54	37.97	36.70	15.5%	9.2%
10	Test 16 - 1700 GAUSS Flosperse 3000A - 300g/ton	41.44	34.10	68.75	1.65	38.95	38.30	17.3%	10.5%
11	Test 20 - 1700 GAUSS Clariant 19674 - 50g/ton	41.44	34.10	69.53	2.54	38.44	37.90	17.1%	10.2%
12	Test 21 - 1700 GAUSS Clariant 19674 - 150g/ton	41.44	34.10	66.91	1.70	39.04	37.60	15.0%	9.3%
13	Test 22 - 1700 GAUSS Clariant 19674 - 300g/ton	41.44	34.10	67.83	2.80	39.32	36.60	12.1%	7.4%
14	Test 26 - 1700 GAUSS Clariant 19124 - 50g/ton	41.44	34.10	67.71	1.45	39.40	37.00	12.7%	7.8%
15	Test 27 - 1700 GAUSS Clariant 19124 - 150g/ton	41.44	34.10	69.52	2.32	38.90	38.00	16.6%	10.0%
16	Test 28 - 1700 GAUSS Clariant 19124 - 300g/ton	41.44	34.10	68.34	2.42	37.89	37.30	0.0%	-0.9%
17	Test 32 - 1700 GAUSS Clariant 19259 - 50g/ton	41.44	34.10	67.44	2.81	39.34	37.20	13.6%	8.4%
18	Test 33 - 1700 GAUSS Clariant 19259 - 150g/ton	41.44	34.10	69.00	3.17	38.87	36.50	13.0%	7.8%
19	Test 34 - 1700 GAUSS Clariant 19259 - 300g/ton	41.44	34.10	67.87	2.46	37.91	37.30	16.9%	10.3%
20	Test 38 - 1700 GAUSS Clariant 19222 - 50g/ton	41.44	34.10	65.42	4.61	40.09	34.10	3.6%	2.2%
21	Test 39 - 1700 GAUSS Clariant 19222 - 150g/ton	41.44	34.10	68.04	3.96	38.62	37.60	16.4%	10.0%
22	Test 40 - 1700 GAUSS Clariant 19222 - 300g/ton	41.44	34.10	67.20	3.54	38.10	36.90	15.8%	9.7%
23	Test 44 - 1700 GAUSS Clariant 19675 - 50g/ton	41.44	34.10	63.79	6.31	38.34	36.80	15.8%	10.2%
24	Test 45 - 1700 GAUSS Clariant 19675 - 150g/ton	41.44	34.10	63.79	6.31	37.73	37.00	17.8%	11.4%
25	Test 46 - 1700 GAUSS Clariant 19675 - 300g/ton	41.44	34.10	67.20	3.54	38.12	38.50	19.5%	12.1%
26	Test 50 - 1700 GAUSS Clariant 19170 - 50g/ton	41.44	34.10	67.71	1.45	39.12	36.20	11.3%	6.9%
27	Test 51 - 1700 GAUSS Clariant 19170 - 150g/ton	41.44	34.10	63.79	6.31	38.10	37.10	17.1%	11.1%
28	Test 52 - 1700 GAUSS Clariant 19170 - 300g/ton	41.44	34.10	69.53	2.54	38.53	37.80	16.7%	10.0%

Fonte: Empresa XYZ (2024).

Em relação à qualidade do concentrado obtido, observa-se na tabela da Figura 6 que a maioria dos reagentes promoveu elevação no teor de ferro e redução do teor de sílica, quando comparado ao teste de referência sem reagente (64,47% Fe e 5,65% SiO₂). Estes resultados indicam um desempenho potencial desses reagentes na melhoria da qualidade química do concentrado, podendo futuramente ser utilizados como recurso corretivo, caso o produto da planta apresente desvios fora dos padrões especificados. No entanto, o foco principal deste trabalho reside na maximização da recuperação de ferro (RFe) e da recuperação mássica (RM). Neste caso, os resultados obtidos para os ensaios com 1700 Gauss não atenderam aos critérios estabelecidos.

O teste de referência, sem uso de reagentes, apresentou recuperação de ferro de 29,09% e recuperação mássica de 18,73%. Nenhum dos reagentes testados, em nenhuma das concentrações avaliadas, superou esses valores. A recuperação de ferro nos testes com reagentes variou entre 0,0% e 19,5%, enquanto a recuperação

mássica variou de -0,9% a 12,1%, valores significativamente inferiores ao *benchmark* estabelecido pelo teste de referência.

Neste contexto, entende-se que os ensaios conduzidos com campo magnético de 1700 Gauss não atingiram os resultados esperados no que tange ao aumento de recuperação de ferro e de massa. Ainda que apresentem melhoria na qualidade química do concentrado, essas condições operacionais se mostram inadequadas para aplicação prática voltada à maximização da recuperação em processos industriais.

De qualquer modo, é possível compreender esse resultado a partir de Svoboda (2004), que afirma que a eficiência da separação magnética está diretamente relacionada à intensidade do campo aplicado e à susceptibilidade magnética das partículas. Em equipamentos de baixa intensidade, como o Tubo de Davis operando a 1700 Gauss, a força magnética aplicada é suficiente apenas para reter partículas com alto momento magnético, como aquelas com teores elevados de magnetita. No entanto, em minérios com predominância de hematita, cuja susceptibilidade magnética é consideravelmente inferior, o campo de baixa intensidade tende a apresentar limitações severas de eficiência, especialmente em frações finas. Nesse contexto, a aplicação de reagentes tem sido proposta como alternativa para aumentar a seletividade e modificar a resposta das partículas ao campo magnético (Souza et al., 2021).

Contudo, o desempenho observado nos ensaios indica que, sob as condições testadas, os reagentes não foram capazes de induzir alterações significativas na mobilidade magnética das partículas que permitissem sua recuperação eficiente em 1700 Gauss, podendo estar relacionada à natureza dos reagentes empregados, muitos dos quais atuam como dispersantes, supressores ou agentes de modificação superficial. De acordo com Fuerstenau et al. (2007), tais reagentes podem alterar a superfície das partículas, modificando sua carga, grau de dispersão e comportamento hidrodinâmico, mas não necessariamente sua susceptibilidade magnética. Assim, ainda que se verifique uma melhora na pureza do concentrado – com a rejeição mais eficiente de minerais de ganga, como a sílica – isso não se traduz, automaticamente, em elevação da recuperação mássica ou férrica.

Adicionalmente, Wills e Finch (2016) ressaltam que, em operações de separação magnética úmida, a eficiência de coleta é altamente dependente do equilíbrio entre forças magnéticas e hidrodinâmicas. Em intensidades mais baixas, partículas de menor tamanho e menor magnetização tendem a ser arrastadas pela

corrente líquida e não são retidas pelo campo. O uso de reagentes pode, inadvertidamente, intensificar esse fenômeno ao promover a dispersão das partículas, reduzindo o efeito de aglomeração e tornando-as ainda menos susceptíveis à captura. Essa hipótese é corroborada por estudos que apontam que reagentes dispersantes, embora úteis para controle de granulometria e estabilidade de polpas, podem comprometer a eficiência da separação magnética quando aplicados em concentrações inadequadas (Alexandrino et al., 2016).

É importante considerar, também, o papel da seletividade no contexto da eficiência global do processo. Em tese, um concentrado com maior teor de ferro e menor teor de sílica representa um produto de melhor qualidade. No entanto, conforme exposto por Correa (2018) em processos de concentração mineral, a qualidade deve ser avaliada conjuntamente com a recuperação, uma vez que perdas elevadas de material valioso invalidam ganhos qualitativos marginais (Correa, 2018). Dessa forma, mesmo que os testes com reagentes tenham gerado concentrados mais ricos em ferro, o baixo percentual de material recuperado os torna tecnicamente inviáveis para implementação industrial nas condições operacionais estudadas.

Outro fator relevante diz respeito à interação entre reagentes e a matriz mineralógica do minério. Conforme destaca Mendes, Silva e Gomes et al. (2021), reagentes orgânicos apresentam comportamento altamente específico, dependendo da composição da superfície mineral, do pH do meio e da presença de íons interferentes. A ausência de resposta significativa dos reagentes à separação em baixa intensidade pode indicar que, sob as condições físico-químicas do ensaio, não ocorreu adsorção efetiva nas superfícies das partículas magnéticas, ou que os mecanismos de ação dos reagentes não foram compatíveis com o ambiente eletrocinético estabelecido (Mendes et al., 2021).

Por fim, deve-se mencionar que a baixa recuperação obtida em 1700 Gauss não implica, necessariamente, a ineficácia dos reagentes testados, mas sim sua limitação frente a uma condição operacional restritiva.

A tabela de análise química, expressa pela figura 7, apresenta os testes conduzidos com aplicação de campo magnético de 4000 Gauss. Os resultados apresentados evidenciam um desempenho significativamente superior em termos de recuperação, tanto de ferro (RFe) quanto de massa (RM), em comparação aos ensaios realizados em baixa intensidade magnética (1700 Gauss).

Figura 7 - Análise Química dos ensaios a 4000 Gauss (print – captura de tela)

Sample		Feed		Concentrate		Tailings		Results	
		Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	RFe	RM
1	Test 1.2 - 4000 GAUSS	41.44	34.10	67.39	2.66	38.91	36.30	12.24%	7.49%
2	Test 5 - 4000 GAUSS Flosperse 2505 - 50g/ton	41.44	34.10	67.43	3.88	35.45	41.20	30.7%	18.9%
3	Test 6 - 4000 GAUSS Flosperse 2505 - 150g/ton	41.44	34.10	66.94	3.37	36.05	41.20	29.0%	18.0%
4	Test 7 - 4000 GAUSS Flosperse 2505 - 300g/ton	41.44	34.10	68.21	3.13	34.83	42.80	34.4%	21.0%
5	Test 11 - 4000 GAUSS Flosperse 3000 - 50g/ton	41.44	34.10	65.63	4.19	35.28	41.00	30.8%	19.3%
6	Test 12 - 4000 GAUSS Flosperse 3000 - 150g/ton	41.44	34.10	64.65	5.53	35.17	40.90	31.4%	20.0%
7	Test 13 - 4000 GAUSS Flosperse 3000 - 300g/ton	41.44	34.10	65.40	6.53	36.31	41.00	29.8%	19.0%
8	Test 17 - 4000 GAUSS Flosperse 3000A - 50g/ton	41.44	34.10	66.57	5.65	36.17	41.30	30.2%	19.0%
9	Test 18 - 4000 GAUSS Flosperse 3000A - 150g/ton	41.44	34.10	65.06	5.24	34.99	41.70	32.8%	20.9%
10	Test 19 - 4000 GAUSS Flosperse 3000A - 300g/ton	41.44	34.10	66.38	5.34	36.30	41.00	29.3%	18.4%
11	Test 23 - 4000 GAUSS Clariant 19674 - 50g/ton	41.44	34.10	67.43	4.64	34.83	41.30	32.4%	19.9%
12	Test 24 - 4000 GAUSS Clariant 19674 - 150g/ton	41.44	34.10	63.96	6.31	34.82	41.20	32.6%	21.0%
13	Test 25 - 4000 GAUSS Clariant 19674 - 300g/ton	41.44	34.10	62.94	7.23	35.64	41.70	32.5%	21.4%
14	Test 29 - 4000 GAUSS Clariant 19124 - 50g/ton	41.44	34.10	66.18	5.03	35.67	41.80	31.7%	20.0%
15	Test 30 - 4000 GAUSS Clariant 19124 - 150g/ton	41.44	34.10	65.98	4.01	36.63	39.50	25.0%	15.7%
16	Test 31 - 4000 GAUSS Clariant 19124 - 300g/ton	41.44	34.10	65.16	4.76	35.73	42.40	32.8%	21.0%
17	Test 35 - 4000 GAUSS Clariant 19259 - 50g/ton	41.44	34.10	62.94	7.23	35.46	41.20	32.3%	21.2%
18	Test 36 - 4000 GAUSS Clariant 19259 - 150g/ton	41.44	34.10	62.65	4.58	36.05	41.40	30.2%	19.9%
19	Test 37 - 4000 GAUSS Clariant 19259 - 300g/ton	41.44	34.10	66.46	5.21	35.98	40.00	27.5%	17.1%
20	Test 41 - 4000 GAUSS Clariant 19222 - 50g/ton	41.44	34.10	64.79	6.50	36.07	40.40	28.5%	18.2%
21	Test 42 - 4000 GAUSS Clariant 19222 - 150g/ton	41.44	34.10	64.86	5.03	35.61	39.60	27.6%	17.4%
22	Test 43 - 4000 GAUSS Clariant 19222 - 300g/ton	41.44	34.10	63.58	6.34	35.21	40.40	30.8%	19.9%
23	Test 47 - 4000 GAUSS Clariant 19675 - 50g/ton	41.44	34.10	64.41	6.30	34.33	42.40	36.2%	23.2%
24	Test 48 - 4000 GAUSS Clariant 19675 - 150g/ton	41.44	34.10	65.54	6.08	35.86	42.90	34.1%	21.9%
25	Test 49 - 4000 GAUSS Clariant 19675 - 300g/ton	41.44	34.10	63.79	6.31	36.49	39.50	25.9%	16.7%
26	Test 53 - 4000 GAUSS Clariant 19170 - 50g/ton	41.44	34.10	61.58	8.31	35.37	39.40	29.5%	19.6%
27	Test 54 - 4000 GAUSS Clariant 19170 - 150g/ton	41.44	34.10	62.94	7.23	35.81	40.40	29.8%	19.5%
28	Test 55 - 4000 GAUSS Clariant 19170 - 300g/ton	41.44	34.10	64.47	5.65	36.27	41.30	30.1%	19.5%

Fonte: Empresa XYZ (2024).

Verifica-se que todos os testes realizados com reagentes, independentemente da concentração utilizada, resultaram em valores de RFe e RM superiores aos obtidos no teste de referência para 4000 Gauss (RFe = 12,24%; RM = 7,49%), satisfazendo, portanto, o objetivo principal da pesquisa, que consiste na maximização das recuperações.

Entretanto, ao se observar os parâmetros de qualidade do concentrado, notadamente os teores de ferro (Fe) e sílica (SiO₂), verifica-se que nem todos os testes promoveram melhoria em relação ao teste de referência. Em alguns casos, houve redução no teor de ferro e elevação significativa do teor de sílica no concentrado, comprometendo a qualidade do produto final. Essas variações indicam que, embora a recuperação tenha sido favorecida em todos os casos, a seletividade do processo não foi igualmente satisfatória para todos os reagentes e condições de dosagem.

Destacam-se, positivamente, os testes nos quais foram simultaneamente obtidas altas recuperações (RFe e RM) e elevada qualidade do concentrado, com teor

de ferro superior ao do teste de referência (67,39%) e teor de sílica inferior a 3%. Dentre esses, os melhores resultados concentram-se nos testes com os reagentes Florperser 2505 (300 g/t), Florperser 3000A (150 g/t), Clariant 19675 (150 e 300 g/t) e Clariant 19259 (300 g/t), todos indicando alto desempenho tanto na eficiência de recuperação quanto na seletividade da separação magnética.

Com base nos dados obtidos, entende-se que o campo magnético de 4000 Gauss, aliado à escolha adequada de reagentes e suas concentrações, pode ser eficaz para melhorar o desempenho do processo de separação magnética em escala laboratorial. Esses resultados fornecem subsídios importantes para estudos futuros em equipamentos de maior porte, cuja operação pode ser ajustada a partir dos parâmetros identificados neste estudo preliminar.

Estes achados concordam com o que já foi argumentado por Svoboda (2004) em que a força magnética aplicada em separadores de alta intensidade é capaz de superar as forças gravitacionais e hidrodinâmicas que atuam sobre partículas finas e fracamente magnéticas, promovendo sua retenção e, conseqüentemente, elevando os índices de recuperação de ferro (RFe) e recuperação mássica (RM).

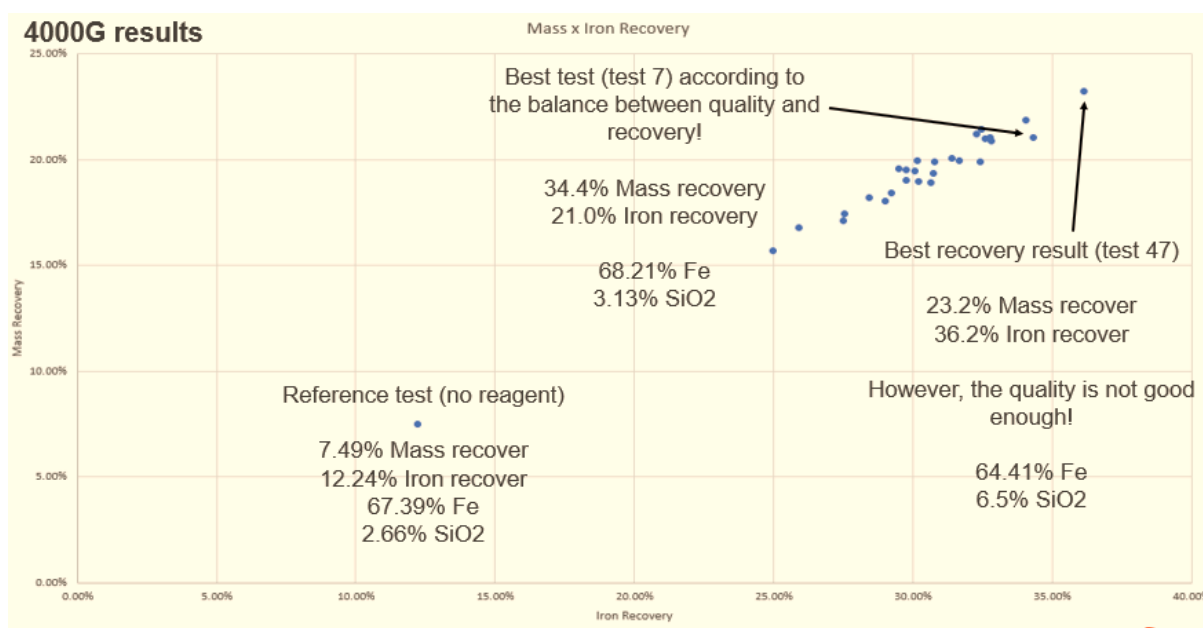
Essa melhora significativa na recuperação pode estar relacionada à maior capacidade do campo magnético de 4000 Gauss em capturar partículas de hematita e minerais com susceptibilidade intermediária, que respondem de forma limitada à separação em baixa intensidade (Coelho et al., 2024). O uso de reagentes, por sua vez, atua de forma complementar, otimizando as condições de dispersão, promovendo a desagregação de partículas finas e mitigando efeitos como a formação de aglomerados, os quais, segundo Filippov et al. (2010), podem comprometer negativamente tanto a seletividade quanto a eficiência da separação. Reagentes dispersantes e modificadores de superfície, ao atuarem sobre as propriedades eletrocinéticas das partículas, favorecem a sua interação com o campo magnético quando este é suficientemente intenso.

Por outro lado, os dados também revelam que a aplicação de reagentes nem sempre resultou em melhoria na qualidade química do concentrado. Como descrito, em diversos testes, os teores de ferro no concentrado foram inferiores ao do teste de referência, enquanto os níveis de sílica permaneceram elevados. Este comportamento pode estar relacionado a efeitos negativos da ação dos reagentes, como o aumento

da mobilidade de partículas de ganga ou a redução da seletividade da separação. Wills e Finch (2016) destacam que, em processos de alta intensidade magnética, a seletividade pode ser comprometida se não houver controle adequado da dosagem de reagentes, especialmente quando estes interferem na estabilidade das suspensões minerais e no potencial zeta das partículas.

Ainda sobre os resultados sob o campo magnético de 4000 Gauss, a Figura 8 apresentada a seguir complementa a discussão relacionando a recuperação de massa e a recuperação de ferro no eixo horizontal. Cada ponto no gráfico representa um teste específico, permitindo a visualização simultânea do desempenho em termos de eficiência de recuperação.

Figura 8 - Relação da recuperação de massa (%) com a recuperação de ferro (%) nos testes realizados a 4000 Gauss



Fonte: autoria própria.

Observa-se que o teste de referência, conduzido sem a adição de reagentes, apresenta os menores valores de desempenho, com 7,49% de recuperação mássica e 12,24% de recuperação de ferro, confirmando o ganho expressivo proporcionado pela introdução de reagentes sob alta intensidade de campo.

Destaca-se ainda no gráfico o teste 47, que atingiu os maiores valores absolutos de recuperação: 23,2% de recuperação de massa e 36,2% de recuperação de ferro. No entanto, apesar do desempenho superior nos critérios quantitativos, a

qualidade do concentrado obtido nesse teste foi insatisfatória, com 64,41% de teor de ferro e 6,5% de sílica, valores inferiores aos observados em outros testes.

Por sua vez, o teste 7 apresentou o melhor equilíbrio entre eficiência de recuperação e qualidade do concentrado. Com 34,4% de recuperação de massa e 21,0% de recuperação de ferro, os teores alcançados no concentrado — 68,21% de ferro e 3,13% de sílica — representam uma melhoria significativa em relação ao teste de referência, tanto do ponto de vista qualitativo quanto quantitativo. Assim, o teste 7 se sobressai como o melhor desempenho global dentre os ensaios realizados, combinando alto rendimento operacional com qualidade superior do produto final.

Finalmente, com base na análise dos testes realizados sob campo magnético de 4000 Gauss, foram identificados quatro ensaios que apresentaram desempenho superior em relação aos demais, considerando os critérios de recuperação de ferro (RFe), recuperação mássica (RM) e qualidade química do concentrado. Os testes de destaque foram os de número 5, 7, 23 e 29 – tabela da Figura 9. Dentre estes, após avaliação técnica detalhada, foram selecionados apenas os testes 7, 23 e 29 para continuidade dos estudos em escala piloto, restringindo-se a três reagentes distintos, conforme proposto no delineamento experimental para as etapas subsequentes.

Figura 9 - Ensaios com os melhores desempenhos considerando os critérios de recuperação de ferro (RFe), recuperação mássica (RM) e qualidade química do concentrado (print – captura de tela)

Sample	Feed		Concentrate		Tailings		Results	
	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	RFe	RM
1 Test 1.2 - 4000 GAUSS	41.44	34.10	67.39	2.66	38.91	36.3	12.2%	7.5%
2 Test 7 - 4000 GAUSS Flosperse 2505 - 300g/ton	41.44	34.10	68.21	3.13	34.83	42.80	34.4%	21.0%
4 Test 23 - 4000 GAUSS Clariant 19674 - 50g/ton	41.44	34.10	67.43	4.64	34.83	41.30	32.4%	19.9%
8 Test 29 - 4000 GAUSS Clariant 19124 - 50g/ton	41.44	34.10	66.18	5.03	35.67	41.80	31.7%	20.0%
10 Test 5 - 4000 GAUSS Flosperse 2505 - 50g/ton	41.44	34.10	67.43	3.88	35.45	41.20	30.7%	18.9%
11 Test 17 - 4000 GAUSS Flosperse 3000A - 50g/ton	41.44	34.10	66.57	5.65	36.17	41.30	30.2%	19.0%
14 Test 19 - 4000 GAUSS Flosperse 3000A - 300g/ton	41.44	34.10	66.38	5.34	36.30	41.00	29.3%	18.4%
15 Test 37 - 4000 GAUSS Clariant 19259 - 300g/ton	41.44	34.10	66.46	5.21	35.98	40.00	27.5%	17.1%
19 Test 30 - 4000 GAUSS Clariant 19124 - 150g/ton	41.44	34.10	65.98	4.01	36.63	39.50	25.0%	15.7%

Fonte: Empresa XYZ (2022).

Apesar do teste 5 (reagente SNF Flosperse 2505, 50 g/t) ter apresentado os melhores resultados em termos de qualidade química do concentrado, com teor de ferro de 67,43% e teor de sílica de 3,88%, suas recuperações foram inferiores às observadas nos demais testes destacados, com RFe de 30,7% e RM de 18,9%.

Considerando que o objetivo principal da pesquisa está centrado no aumento das recuperações de ferro e de massa, o desempenho quantitativo abaixo dos valores dos testes 7, 23 e 29 resultou na exclusão do teste 5 da etapa de validação em escala piloto.

Quanto ao teste 7 (reagente SNF Flosperse 2505, 300 g/t), como mencionado anteriormente, foi o que apresentou o melhor desempenho global, combinando altos índices de recuperação ($R_{Fe} = 34,4\%$, $RM = 21,0\%$) com excelente qualidade química do concentrado (68,21% de ferro e 3,13% de sílica). Esses resultados indicam uma ótima sinergia entre o reagente utilizado e o campo magnético aplicado, sendo este teste selecionado como principal referência para continuidade do estudo, especialmente na avaliação em equipamentos de separação magnética de média intensidade (MIMS).

Já os testes 23 (Clariant 19674, 50 g/t) e 29 (Clariant 19124, 50 g/t) também foram selecionados para as etapas subsequentes. Ambos apresentaram recuperações de ferro e massa bastante satisfatórias, com destaque para os valores de R_{Fe} (32,4% e 31,7%) e RM (19,9% e 20,0%), respectivamente. Embora os teores de sílica nos concentrados (4,64% e 5,08%) estejam ligeiramente acima dos valores ideais, tal desvio foi considerado tolerável, visto que não compromete os objetivos centrais do estudo, os quais priorizam a maximização da recuperação de ferro e massa em detrimento da seletividade química.

Com base nessas análises, os reagentes selecionados para os ensaios em escala piloto com equipamentos industriais (como WHIMS, MIMS e LIMS) foram:

- SNF Flosperse 2505, na concentração de 300 g/t (Teste 7);
- Clariant 19674, na concentração de 50 g/t (Teste 23);
- Clariant 19124, na concentração de 50 g/t (Teste 29).

Esses três reagentes demonstraram maior potencial de aplicação industrial, aliando eficiência de recuperação a níveis aceitáveis de seletividade, e serão objeto de investigação em escala piloto, prevista para o ano de 2025.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar a influência da adição de diferentes reagentes químicos no desempenho da separação magnética, utilizando o Tubo de Davis, aplicado a um minério de ferro. A análise considerou parâmetros fundamentais como recuperação mássica, recuperação de ferro e qualidade química do concentrado, em diferentes condições de intensidade de campo magnético e concentrações de reagentes.

Os resultados demonstraram que, em campo magnético de baixa intensidade (1700 Gauss), ainda que tenha havido melhorias na qualidade do concentrado em alguns casos, nenhum dos reagentes testados foi capaz de superar os valores de recuperação do teste de referência sem reagente. Dessa forma, os testes nessa condição foram considerados ineficazes do ponto de vista da recuperação global, inviabilizando sua aplicação nas condições operacionais analisadas.

Em contrapartida, os testes realizados sob campo magnético de alta intensidade (4000 Gauss) apresentaram desempenho amplamente superior, com todos os reagentes resultando em ganhos nas recuperações de ferro e de massa em relação ao teste de referência. A análise detalhada permitiu identificar três reagentes com os melhores desempenhos dentre os demais: SNF Flosperse 2505 (teste 7), Clariant 19674 (teste 23) e Clariant 19124 (teste 29). Dentre esses, o teste 7 se destacou por apresentar simultaneamente a melhor recuperação e a melhor qualidade do concentrado.

Com base nesses resultados, os três reagentes mencionados foram selecionados para a continuidade da pesquisa em escala piloto, utilizando equipamentos industriais de separação magnética como MIMS, WHIMS e LIMS. O estudo fornece, assim, uma base experimental sólida para o aprimoramento de rotas de concentração magnética, reforçando o papel estratégico do uso de reagentes na otimização do desempenho de separadores magnéticos em minérios de ferro com características complexas.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRINO, J. S. et al. Dispersion degree and zeta potential of hematite. **Revista Escola de Minas**, v. 69, n. 2, p. 193–198, 2016.
- ASSIS, B. D. DE. **Caracterização tecnológica de uma pilha de estoque de minério hematítico para produção de um pellet feed**. [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2019.
- COELHO, F. G. F. et al. Avaliação da Influência do Magnetismo Residual na Soldagem GTAW de Peças Inspeccionadas pelo Método de Partículas Magnéticas. **Soldagem & Inspeção**, v. 29, p. 1–16, 2024.
- CORREA, A. DE S. **Estudo dos parâmetros para concentração magnética do minério de ferro proveniente da mina de Posse-MG**. [s.l.] Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Araxá, 2018.
- FILIPPOV, L. O.; FILIPPOVA, I. V.; CHEHREGANI, A. N. The use of dispersants in the selective flocculation of hematite from quartz. **International Journal of Mineral Processing**, v. 94, p. 72–79, 2010.
- FUERSTENAU, M. C.; JAMESON, G. J.; Yoon, R.-H. **Froth flotation: a century of innovation**. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2007.
- HOLANDA, L. M. et al. Comportamento magnético de materiais por meio da mecânica estatística. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, p. 1–11, 2020.
- LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. **Tratamento de minérios**. 5ed. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
- MELO, M. R. DE. **Aumento da recuperação metalúrgica da etapa de separação magnética de baixa intensidade da usina de beneficiamento da vale fertilizantes de Catalão-GO**. [s.l.] Universidade Federal de Goiás, 2016.
- MENDES, M. V. A. et al. Revisão Sistemática: Separação Magnética no Processamento Mineral. **Holos (Natal, RN)**, v. 2021, n. 4, p. 1, 2021.
- ROCHA, R. B. DA. **Concentração de rejeito de flotação e lamas de minério de ferro por separação magnética**. [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.
- RODRIGUES, G. H. G. **Concentração magnética de alta intensidade (whims) para rejeito de ferro com a tecnologia super bigflux® gaustec magnetic technology**. [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2022.
- SOUZA, A. H. et al. Mineralogical characterization applied to iron ore tailings from the desliming stage with emphasis on quantitative electron microscopy (qem). **Materials Research**, v. 24, n. 3, 2021.
- SVOBODA, J. **Magnetic techniques for the treatment of materials**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- WILLS, B. A.; FINCH, J. **Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. 8. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016.

XIONG, D.; SONG, S.; ZHAO, C.; HU, Y. Surface magnetism and floatability of hematite modified by sodium hexametaphosphate. **Applied Surface Science**, v. 357, p. 2083–2089, 2015.

ZANUELO, P. H. G. **Separação de vanádio e titânio através da pré-redução da hematita do minério de vanádio**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2022.