

PROCESSOS DE CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA APLICADA AO BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

Héllen Tatiane Dias Cordeiro¹, Ângela Maria da Silva², Eliane Alves Souza³, Talívia Rodrigues Brito⁴, Silvânia Pereira Monção⁵, Jônatas Franco Campos da Mata⁶

¹Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Janaúba, Brasil,

hellen.cordeiro@ufvjm.edu.br

^{2,3,4,5}Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Janaúba, Brasil

Resumo: O presente trabalho apresenta uma pesquisa aplicada aos equipamentos e processos de concentração magnética no beneficiamento de minério de ferro. Inicialmente, conduziu-se uma revisão bibliográfica ampla. Em seguida, foram investigados dois estudos de casos práticos em mineradoras, nos quais os separadores magnéticos foram responsáveis pela elevação da recuperação metalúrgica e mássica, além de aprimorar a qualidade dos produtos, economia de recursos e sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Concentração magnética; Recuperação metalúrgica; Qualidade dos produtos; Sustentabilidade ambiental; Eficiência operacional.

INTRODUÇÃO

Considerações Gerais

A mineração de ferro é amplamente reconhecida como uma das principais commodities minerais no cenário global, sendo a principal fonte de ferro metálico, matéria-prima indispensável para a fabricação de aço na indústria siderúrgica (Lu, 2015). As reservas globais de minério de ferro são estimadas em aproximadamente 180 bilhões de toneladas, das quais 85 bilhões de toneladas ao ferro contido. Atualmente, Austrália e Brasil destacam-se como os maiores produtores e exportadores dessa matéria-prima, seguidos pela China e pela Índia (USGS, 2023).

Os depósitos de minério de ferro, segundo Carvalho et al. (2014), podem ser classificados de acordo com seu tipo de formação (sedimentar, soluções hidrotermais, atividades vulcânicas e metamorfismo). Os depósitos de maior relevância são aqueles resultantes da sedimentação de forma acamada, pois originam as formações ferríferas bandadas – Banded Iron Formation (BIFs), que constituem as maiores reservas de ferro do mundo. As BIFs são caracterizadas por serem rochas laminadas constituídas por bandas de minerais portadores de ferro (especialmente magnetita e hematita) e sílica (quartzo).

O ferro é o quarto elemento mais encontrado e, dentre os metais, é o segundo mais abundante na crosta terrestre, correspondendo a uma porcentagem média de 5% em massa dessa composição (Takehara,

2004). Embora diversos minerais tenham o ferro como componente essencial, apenas alguns destes são considerados economicamente viáveis para exploração do ferro, dependendo das variações de teor e das distribuições desses minerais nas rochas que constituem os corpos de minério (Carvalho et al., 2014).

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

Tabela 1. Classe e fórmula química dos principais minerais minério e minerais de ganga de depósitos de minério de ferro (Carvalho et al., 2014)

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

Acredita-se que 90% ou mais de todas as formações de ferro que foram preservadas se encontram nos distritos da classe “muito grande” (Figura 1), os quais são: Labrador Trough e suas extensões no Canadá; Hamersley na faixa da Austrália Ocidental; Quadrilátero Ferrífero situado em Minas Gerais, Brasil; bacias do Transvaal-Griquatown, na África do Sul; e áreas de Krivoy Rog-KMA da URSS (James e Trendall, 1982).

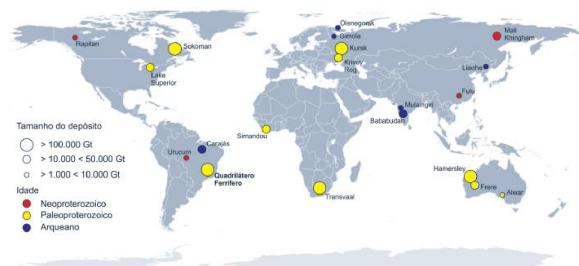


Figura 1. Localizações dos principais depósitos de minério de ferro no mundo (Castro e Dias, 2018)

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

Beneficiamento mineral

O tratamento ou beneficiamento de minérios consiste em operações, aplicada aos bens minerais, com intuito de modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem modificar a identidade química ou física dos minerais (Luz e Lins, 2010).

A Figura 2 exibe um fluxograma típico de beneficiamento de minérios, o qual é aplicável também para minérios de ferro. Segundo Luz e Lins (2010), essas operações unitárias são classificadas em: cominuição, compondo-se da britagem e moagem; classificação, destacando-se peneiramento e ciclonagem; concentração, que se subdivide em gravítica, magnética, eletrostática e flotação; desaguamento, consistindo em espessamento e filtragem; secagem, na qual os principais equipamentos são secador rotativo, spray dryer e secador de leito fluidizado; e disposição de rejeitos.

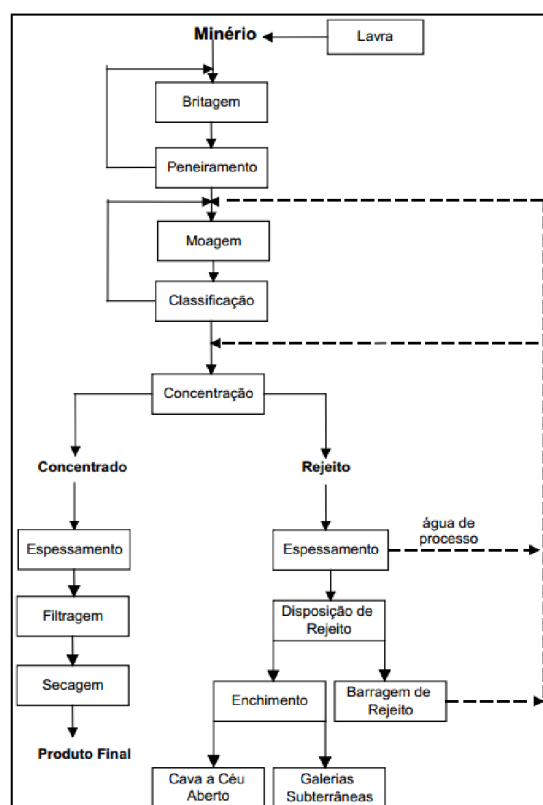


Figura 2. Fluxograma de uma típica rota de tratamento de minério de ferro (Luz e Lins, 2010)

De acordo com Carvalho (2012), os produtos de minério de ferro, além de serem definidos pelos teores de ferro e quantidades de impurezas, devem atender também às especificações granulométricas dos produtos gerados, que são rigidamente controladas.

Se tratando de minério de ferro, os produtos gerados nas usinas de beneficiamento ocorrem basicamente em três faixas granulométricas, as quais podem ter diferenças a depender da usina produtora e das características do minério (Vale, 2021):

- Granulado (*lump ore*), minério granulado entre 50,0 e 6,35 mm. Para consumo em altos-fornos;

- *Sinter feed*, representa a faixa granulométrica de 6,35 a 0,150 mm para sinterização;
- *Pellet feed*, concentrado abaixo de 0,150 mm, utilizado na produção de pelotas para alto forno.

Particularidades da Separação Magnética

A separação magnética pode ser entendida como a interação entre um dipolo magnético e um campo magnético. Quando uma partícula é exposta a esse campo, ela se magnetiza, formando pólos magnéticos em suas extremidades, que se alinham ao longo das linhas de campo (Silva Maximiliano, 2012). Essa técnica de separação possui diversas aplicações, incluindo, dentre outros: separação de materiais ferrosos e não ferrosos, remoção de gangas magnéticas em minérios (por exemplo, fosfatos), concentração de minérios de ferro e reciclagem de resíduos industriais (Svoboda e Fujita, 2003). A terceira aplicação citada é o objeto do presente trabalho.

A separação magnética é um método utilizado para separar misturas, fundamentado nas propriedades magnéticas dos materiais. Este processo explora a diferença na suscetibilidade magnética, que é a habilidade de um material ser magnetizado quando submetido a um campo magnético (Silva, 2020). O campo magnético refere-se à área de influência da força magnética gerada por um corpo magnético (ímã natural) ou por um corpo previamente magnetizado (ímã induzido), sendo representado por linhas que indicam a direção de atração ou repulsão do dipolo desse corpo (Chaves & Chaves Filho, 2013).

Para que a separação ocorra, é necessário que o campo magnético tenha um gradiente de força, ou seja, deve ser um campo convergente, concentrando suas linhas em um ou mais pontos onde a intensidade magnética é maior. Isso provoca uma aceleração nas partículas suscetíveis em direção a esses pontos (Wills & Finch, 2015). Para aprimorar o gradiente dos campos magnéticos gerados, são empregadas matrizes em diversos equipamentos de separação magnética (Chaves & Chaves Filho, 2013).

A suscetibilidade magnética é uma característica intrínseca dos materiais, influenciada por diversos fatores, como composição, estrutura cristalina, tamanho de grão e temperatura, entre outros. Os materiais podem exibir três comportamentos magnéticos principais: diamagnético, paramagnético e ferromagnético (Callister e Retwisch, 2016).

Minerais ferromagnéticos são aqueles que são fortemente atraídos por ímãs comuns, com a magnetita sendo o exemplo mais conhecido. Os minerais paramagnéticos apresentam uma atração fraca, com a hematita sendo um exemplo clássico. Já

os minerais diamagnéticos têm suscetibilidade magnética negativa e, por isso, são repelidos quando expostos a um campo magnético. Entre esses, destacam-se o quartzo, a cerussita, a magnesita, a calcita, a barita, a fluorita e a esfalerita, entre outros (Sampaio et al., 2004).

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

Equipamentos de separação magnética

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

- a) separador magnético de tambor (LIMS) (Figura 3), constituído por um tambor giratório que abriga ímãs permanentes em seu interior. Quando os materiais são alimentados no tambor, os metais ferrosos são atraídos para a superfície do tambor pela força magnética, onde permanecem aderidos. Ao mesmo tempo, os materiais não ferrosos seguem seu caminho e são descarregados na extremidade da correia transportadora ou em calhas. Esse tipo de separador pode ser projetado para lidar com diferentes tamanhos de partículas e capacidades de produção, além de permitir a configuração de variados graus de intensidade magnética para se ajustar a diferentes materiais e requisitos de separação (Sampaio et al., 2018).



Figura 3. Separador magnético de tambor (INBRAS, 2024)

- b) separador magnético de correia (Figura 4), composto por uma correia transportadora que passa sobre um tambor magnético. Este tambor, que é um cilindro oco revestido com ímãs permanentes ou eletroímãs, gera um campo magnético intenso. Conforme a correia se movimenta, os materiais colocados sobre ela são levados em direção ao tambor magnético (Sampaio et al., 2018). Os materiais ferromagnéticos, como partículas de minério contendo ferro, são atraídos pelo campo magnético e se aderem à superfície da correia, enquanto os materiais não magnéticos continuam seu percurso e são descarregados em outra área. À medida que a correia se afasta do tambor, os materiais ferromagnéticos são liberados e coletados em uma área separada (Silva, 2020).



Figura 4. Separador magnético *Steinert* de correia cruzada (Svoboda, 2003)

- c) O separador magnético de carrossel (Figura 5), também conhecido como separador magnético Jones e/ou WHIMS (wet high intensive magnetic separator), é um equipamento utilizado na indústria de mineração para a separação magnética de minerais ferrosos e não ferrosos. Este tipo de separador é composto por várias bobinas magnéticas fixas em um carrossel, que gira em torno de um eixo central. O processo inicia-se com a alimentação sendo direcionada ao centro do carrossel, onde passa pelas bobinas dispostas em uma posição fixa em relação ao eixo. À medida que a alimentação se desloca pelas bobinas, os minerais ferrosos são atraídos pela força magnética e separados dos minerais não ferrosos, que continuam seu trajeto e são descarregados em uma saída distinta (Silva, 2020).



Figura 5. Separador magnético carrossel G-3600 (Gaustec, 2011)

Dentro dos rotores estão localizadas as matrizes, feitas em aço ferromagnético, por onde circula a polpa de minério. As partículas magnéticas são atraídas pelo campo magnético e aderem às placas de imantação (concentrado). Isso acontece, por serem atraídas para as matrizes na região de atuação do campo magnético, devido aos gradientes magnéticos formados no interior das matrizes. Já as partículas não magnéticas (diamagnéticas) são removidas por arraste hidráulico e pela gravidade (rejeito) e as partículas mistas são descartadas por ação entre forças competitivas (médio).

Forças aplicadas à separação magnética

As forças que atuam em uma partícula podem ser representadas de acordo com o diagrama de forças apresentado abaixo na Figura 6. A figura também apresenta os fluxos de material tanto na alimentação do separador magnético, quanto dos produtos gerados na separação: fração magnética, fração não magnética e fração intermediária. Existem também as forças que competem com a força magnética, sendo elas: o peso das partículas, o arraste hidrodinâmico e interações de superfície. Na separação a úmido, o arraste hidráulico é importante e a seletividade da separação pode ser influenciada pelo tamanho da partícula (Svoboda e Fujita, 2003).

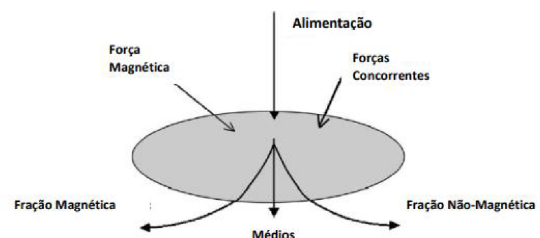


Figura 6 - Diagrama de representação das forças que atuam sobre uma partícula no processo de separação magnética (Svoboda e Fujita, 2003)

A separação das partículas magnéticas das não magnéticas ou das partículas menos magnéticas, ocorre se forem satisfeitas as condições expressas na equação 1.

$$F_m^{mag} > \Sigma F_c^{mag} \text{ e } F_m^{non-mag} < \Sigma F_c^{non-mag} \quad (1)$$

Onde, F_m^{mag} e $F_m^{non-mag}$ se referem, à força magnética que atua sobre as partículas magnéticas e sobre as partículas não magnéticas, respectivamente. E F_c^{mag} e $F_c^{non-mag}$ referem-se às forças concorrentes à força magnética, que atuam sobre as partículas magnéticas e não magnéticas, respectivamente. Portanto, para se obter uma maior recuperação das partículas magnéticas, a intensidade da força magnética deve ser significativamente maior que a soma das intensidades das forças concorrentes (Svoboda e Fujita, 2003).

A força magnética é a principal influência externa sobre as partículas em um separador magnético, sendo diretamente proporcional à intensidade do campo magnético aplicado. Assim, as variações na intensidade do campo podem afetar o desempenho dos separadores. Em geral, um campo magnético mais forte resulta em uma maior recuperação de partículas magnéticas no concentrado. No entanto, há situações em que um aumento no campo pode prejudicar tanto a recuperação quanto à qualidade do concentrado. Isso pode ser atribuído a dois fatores principais: o primeiro é a diminuição da susceptibilidade magnética das partículas à medida que a intensidade do campo aumenta, e o segundo é a redução da área disponível na matriz para captura das partículas, o que ocorre com o aumento do campo aplicado. O aumento da quantidade de material depositado na matriz diminui a porosidade da camada formada, o que, por sua vez, acelera a velocidade de escoamento da polpa no interior da matriz (Svoboda, 1993).

A separação é realizada de forma seletiva, uma vez que é possível controlar com facilidade diversas variações operacionais, como a intensidade do campo magnético, o elemento responsável pela conversão do fluxo, a taxa de alimentação, a porcentagem de sólidos na polpa, a velocidade do anel rotativo ou rotor e descarga das partículas magnéticas (Sampaio et al., 2018).

Concentração magnética de minérios de ferro

Ressalta-se que, para a separação magnética aplicada à minérios de ferro, esta operação unitária é denominada de concentração magnética. Tal nomenclatura deve-se ao fato de haver a rejeição, no processo, de minerais não magnéticos contendo teores mais elevados de sílica e alumina, o que traz o enriquecimento desejado dos teores de ferro nos

produtos. Portanto, a concentração magnética é uma alternativa muito utilizada, em mineradoras de minério de ferro, para a obtenção de concentrados magnéticos de alta pureza, como *Sinter feed* e *Pellet Feed* (Vale, 2021).

A análise das operações de concentração magnética voltadas ao beneficiamento de minério de ferro demonstrou o papel estratégico dessa técnica na indústria mineral brasileira. Em especial, a aplicação da separação magnética em plantas industriais revelou ganhos substanciais tanto na recuperação metalúrgica quanto na qualidade final do concentrado. Essa eficiência é alcançada, principalmente, pela capacidade do processo de separar minerais com diferentes suscetibilidades magnéticas, como a magnetita e a hematita.

Conforme ilustrado na Figura 7, os separadores magnéticos de baixa intensidade (LIMS – Low Intensity Magnetic Separator) são comumente aplicados à separação de partículas de magnetita, devido à sua forte resposta ao campo magnético. O método se destaca por ser contínuo, de baixo consumo energético e elevado rendimento quando aplicado a minérios com predominância de espécies ferromagnéticas.



Figura 7. Separador magnético de tambor LIMS em operação industrial (Metso, 2025)

A separação magnética tem aplicação fundamental na concentração de minérios de ferro, especialmente quando há predominância de minerais como a magnetita, que são fortemente magnéticos (Chaves 2012). Essa operação é favorecida pela simplicidade, seletividade e flexibilidade para ajustes operacionais, como intensidade de campo, tempo de residência e densidade da polpa.

No caso de minérios com maior proporção de hematita, mineral com comportamento paramagnético, é necessário o uso de separadores de alta intensidade, como os WHIMS (Wet High Intensity Magnetic Separator). A Figura 8 exemplifica esse tipo de equipamento, comumente adotado em circuitos de retratamento ou no beneficiamento de itabiritos pobres.

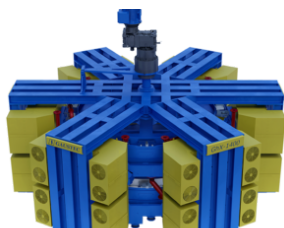


Figura 8. Separador magnético tipo carrossel WHIMS (Gaustec, 2025).

As partículas são atraídas para as matrizes na região de atuação do campo magnético devido aos gradientes formados no interior dessas matrizes (Svoboda e Fujita 2003). O WHIMS é particularmente eficaz na recuperação de hematita finamente disseminada, contribuindo para o aumento do teor de ferro no concentrado final.

Além da recuperação metalúrgica, a separação magnética promove significativa redução nos teores de contaminantes como sílica e alumina, cuja presença excessiva prejudica o processo siderúrgico. Essa purificação torna o produto adequado às exigências industriais, como a produção de sinter feed e pellet feed, conforme relatado no Relatório de Sustentabilidade da Vale (2021).

A separação magnética é uma operação unitária eficaz na concentração de minérios de ferro, especialmente quando os minerais apresentam diferentes graus de susceptibilidade magnética (Sampaio e Luz 2010).

Outro ponto relevante é o controle das variáveis operacionais, que afetam diretamente a seletividade do processo. O bom desempenho da concentração magnética está diretamente relacionado à adequada regulação dos parâmetros operacionais: intensidade de campo, tempo de residência e características granulométricas da alimentação (Chaves 2012).

A resposta diferenciada de magnetita, hematita e quartzo aos campos magnéticos decorre da configuração eletrônica desses minerais; elétrons desemparelhados alinham seus momentos magnéticos quando submetidos a um campo externo, (Callister e Rethwisch 2016).

No plano estratégico, elevar a recuperação e cortar perdas encaixa-se nas metas de sustentabilidade da mineração brasileira. A literatura indica que tecnologias de maior eficiência energética reforçam essa agenda (Carvalho, 2012). Além disso, o controle mineralógico e tecnológico do beneficiamento é apontado como requisito para ganhos metalúrgicos, ambientais e econômicos (Carvalho et al., 2014).

A escolha inadequada da granulometria ou da intensidade de campo pode comprometer a eficiência

da separação, gerando sobrecarga da matriz ou perdas de partículas úteis no rejeito. Um campo magnético excessivamente forte pode diminuir a seletividade, capturando partículas de ganga ou reduzindo a porosidade da matriz magnética (Wills e Finch 2015).

Portanto, a aplicação da concentração magnética, desde que ajustada às características físico-químicas do minério e às condições operacionais, constitui uma etapa técnica e economicamente vantajosa para o beneficiamento de minérios de ferro. Sua eficácia está associada tanto à recuperação de ferro, quanto à melhoria na qualidade do concentrado final, otimizando a performance global da planta.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho baseou-se, inicialmente, em uma pesquisa preliminar, com o objetivo de fornecer uma visão geral sobre as operações de separação magnética e sua aplicabilidade em plantas de beneficiamento de minérios.

Aprofundou-se, posteriormente, a pesquisa com o foco na identificação e detalhamento de estudos de casos reais relacionados a operações de concentração magnética de minério de ferro, com foco em: ações de otimização de processos, ajustes nos equipamentos e ganhos obtidos em termos de qualidade, recuperação metalúrgica e redução de custos.

Foram pesquisadas publicações técnicas na internet, baseadas nas seguintes palavras-chaves: separação magnética, minério de ferro e concentração magnética. Tal pesquisa gerou uma lista de diversos documentos: artigos, livros, capítulos de livros, dissertações, resumos, anais de conferências e citações de referências.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são apresentados dois exemplos práticos e documentados da aplicação da concentração magnética na melhoria da qualidade e recuperação metalúrgica dos produtos de minério de ferro, os quais servem para ilustrar os avanços e desafios na otimização do processo.

1. Otimização da Concentração de minério de ferro em usina de processamento mineral com secagem e concentração Magnética

Este estudo, desenvolvido por Santos (2024), investigou o problema relacionado à baixa recuperação mássica e metalúrgica observada em uma usina de beneficiamento instalada no município de Sabinópolis, Minas Gerais. Essa dificuldade operacional estava ligada a diversos fatores, como:

inadequação da rota de processo, presença de itabiritos de diferentes composições (compacto e semi-compacto) e elevada heterogeneidade da frente de lavra. Como consequência, o minério alimentado à planta apresentava granulometria desfavorável e alto teor de contaminantes como sílica e alumina.

Com o objetivo de avaliar a eficiência de novas estratégias de beneficiamento, foram conduzidos testes em escala piloto utilizando diferentes configurações de equipamentos e rotas de processo. Este trabalho investigou a combinação entre secagem e concentração magnética a seco como alternativa à rota convencional a úmido. A proposta era otimizar a recuperação mássica e o teor de ferro no concentrado final, reduzindo o consumo de água e os impactos ambientais associados.

Entre os equipamentos empregados para a otimização do processo destacam-se:

- Secador rotativo, responsável pela remoção da umidade do minério antes da concentração, permitindo melhor desempenho dos separadores magnéticos a seco;
- Separadores magnéticos de tambor de alta intensidade (7.500 e 14.000 Gauss), utilizados para recuperação de partículas magnéticas em diferentes granulometrias;
- Separador magnético Re-Roll, equipamento de alta intensidade aplicado em múltiplas etapas para elevar o grau de pureza do concentrado;
- Separadores híbridos (úmido e seco), empregados em uma rota combinada para beneficiamento do itabirito compacto, com resultados superiores à concentração isolada.

Conforme demonstra a Figura 9, o secador rotativo foi projetado especificamente para atender à demanda da unidade de Sabinópolis, sendo essencial para reduzir a umidade do minério e viabilizar o funcionamento eficiente da separação magnética a seco. O controle da umidade mostrou-se determinante para a qualidade final do concentrado.



Figura 9. Secador rotativo em fabricação (Santos, 2024)

Além disso, a Figura 10, representa o tambor magnético de 14.000 Gauss utilizado nos testes com partículas finas. Esse equipamento foi responsável pela recuperação de partículas paramagnéticas, como a hematita, em faixas granulométricas menores, contribuindo significativamente para o aumento do teor de ferro no concentrado.



Figura 10. Tambor magnético 1400 Gauss (Modelo RE) (Santos, 2024)

Os testes práticos demonstraram que o itabirito semi-compacto, quando cominuído a menos de 1 mm e submetido à secagem, apresentou recuperação mássica de 49,2% e recuperação metalúrgica de 88,8%, com teor médio de 60,4% de ferro no concentrado. Já para o itabirito compacto, foi adotada uma rota híbrida, onde a fração mais fina foi tratada a úmido e a restante a seco. Essa abordagem resultou em concentrado com 65% de teor de ferro, recuperação mássica de 49,7% e recuperação metalúrgica de 87,7%.

Esses resultados confirmam a eficiência da etapa de secagem como pré-condição para o desempenho ideal dos separadores magnéticos a seco. Além disso, o estudo evidencia que o controle granulométrico e a adaptação dos equipamentos às características mineralógicas do minério são fatores decisivos para o sucesso do processo de concentração magnética, contribuindo para o aumento da produtividade e da sustentabilidade na cadeia do minério de ferro.

2. Concentração Magnética de Alta Intensidade (WHIMS) para Rejeito de Ferro com a Tecnologia Super BigFLUX® GAUSTEC MAGNETIC TECHNOLOGY

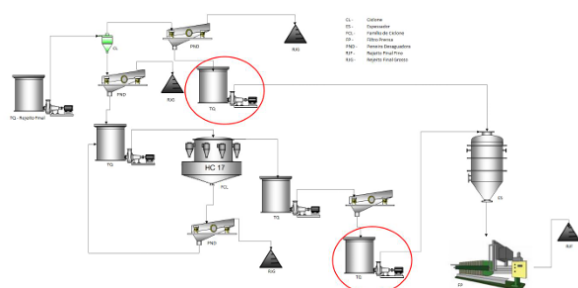
O estudo desenvolvido por Rodrigues (2022) teve, como foco, a avaliação do reaproveitamento de rejeitos da usina de beneficiamento de minério de ferro da empresa Itaminas Comércio de Minérios S/A, localizada no município de Sarzedo, Minas Gerais.

O problema técnico identificado foi o descarte de materiais com elevado teor de ferro na etapa final do processo, os quais apresentavam potencial de reaproveitamento com o uso de tecnologias avançadas de concentração magnética. O objetivo foi demonstrar a viabilidade de recuperação do ferro presente nesse rejeito, por meio da aplicação de

separadores magnéticos do tipo Super BigFLUX®, em diferentes etapas do processo (rougher, cleaner e scavenger), testados em escala piloto.

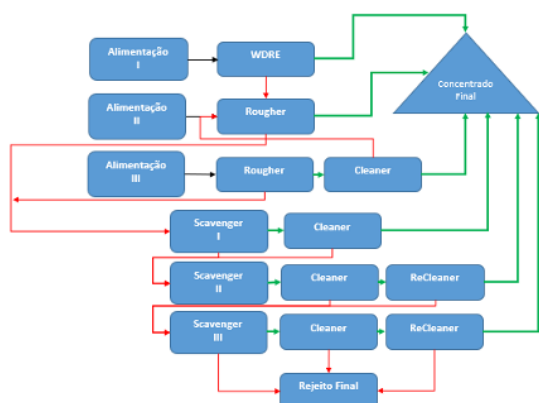
A amostragem foi realizada diretamente no ponto de rejeito final da planta da Itaminas. Conforme descrito, o material foi coletado a partir do overflow de hidrociclones, com densidade média de $1,08 \text{ t/m}^3$ e teor de sólidos entre 10 e 13%, classificado em $-0,038 \text{ mm}$. Esse rejeito foi conduzido para tanques de amostragem, visíveis na Figura 11. A imagem evidencia os dois tanques onde a coleta foi realizada, circulados em vermelho.

Figura 11 - Fluxograma do rejeito final Itaminas (Rodrigues, 2022)



O estudo detalhou a configuração do circuito industrial da usina, composto por uma sequência de separadores magnéticos de diferentes modelos, faixas granulométricas e intensidades de campo. O fluxograma simplificado do processo está representado na Figura 12, onde são destacados os fluxos de concentrados (em verde), rejeitos (vermelho) e alimentação (preto).

Figura 12 – Fluxograma simplificado - Itaminas Comércio de Minério S/A (Rodrigues, 2022)



Nessa configuração, destacam-se os seguintes equipamentos utilizados:

- Tambores magnéticos WDRE para escalpe magnético da alimentação;

- Ghp-400, Gx-3600, G-3600, Ghp-150 e G-3200, operando nas etapas rougher, cleaner, scavenger e recleaner;
- Hexapolares Ghx-1400 para as etapas finais de recuperação.

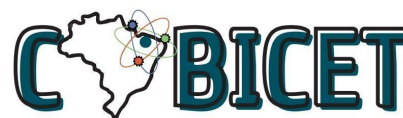
Conforme o fluxograma, o circuito de beneficiamento da planta contempla uma cadeia complexa de separadores magnéticos interligados, permitindo a maximização da recuperação de ferro a partir de rejeitos. A presença de múltiplas etapas em série permite a purificação progressiva do concentrado e a minimização da perda de ferro.

Os testes em planta piloto mostraram resultados altamente positivos. A recuperação metalúrgica e o teor de ferro no concentrado foram significativamente elevados, comprovando a eficiência da rota de concentração magnética com a tecnologia Super BigFLUX®. Embora os resultados numéricos estejam diluídos ao longo das análises do relatório, os dados apresentados reforçam que a aplicação dos separadores magnéticos modernos é capaz de recuperar minério de valor a partir de fluxos antes considerados rejeitos, com qualidade comercial viável e impacto ambiental reduzido.

Dessa forma, o estudo conduzido em Sarzedo evidencia que, mesmo em processos industriais já estabelecidos, a revisão de rotas tecnológicas com foco em aproveitamento de rejeitos pode se traduzir em ganhos significativos de eficiência e sustentabilidade para a indústria mineral brasileira.

3. Análise Integrada dos Estudos de Caso

A análise dos dois estudos de caso evidencia a eficiência da concentração magnética como alternativa viável para o beneficiamento de minérios de ferro, especialmente em contextos de baixo teor, escassez hídrica e reaproveitamento de rejeitos. No caso de Sabinópolis (MG), a combinação da secagem com separação magnética a seco mostrou bons resultados, principalmente para partículas finas de itabirito semi-compacto, alcançando até 60,4% de ferro e alta recuperação metalúrgica. Já o itabirito compacto exigiu uma rota híbrida, com concentração a seco e úmida, atingindo 65% de Fe. No segundo caso, a aplicação da tecnologia Super BigFLUX® no rejeito da Itaminas demonstrou alto desempenho mesmo com partículas finas, superando 63% de Fe no concentrado, com destaque para a eficiência do equipamento e a necessidade de revisar a classificação granulométrica da planta. Em síntese, os estudos reforçam que a concentração magnética, aliada a ajustes operacionais e inovações tecnológicas, pode ser estratégica para aumentar a



recuperação de ferro, reduzir impactos ambientais e melhorar a eficiência das plantas de beneficiamento.

CONCLUSÃO

Os estudos de casos apresentados avaliaram a utilização de testes com diferentes equipamentos de concentração magnética e rotas de processos, permitindo aprimorar a qualidade dos produtos e a eficiência das operações.

No primeiro estudo de caso, na unidade de Sabinópolis em Minas Gerais, a investigação foi dirigida para otimizar a recuperação mássica e o teor de ferro no concentrado final, reduzindo o consumo de água e os impactos ambientais. Verificou-se problemas com rotas de processo ineficientes e grande variabilidade de minérios na alimentação do beneficiamento. Isto acarretava perdas de ferro para o rejeito, além de alto teor de sílica e alumina nos produtos.

Foram testadas diferentes rotas de processo, combinando secagem e concentração magnética como alternativas à rota convencional a úmido.

Foi possível identificar condições adequadas para tratar diferentes tipologias. Para o itabirito semi-compacto, a moagem abaixo de 1 mm seguida de secagem favoreceu o atingimento de bons índices de recuperação mássica, recuperação metalúrgica e teor médio de ferro no concentrado. Para o itabirito compacto, adotou-se uma rota híbrida, tratando-se a fração mais fina a úmido e a restante a seco, com índices de recuperação e qualidade aceitáveis.

Desta forma, foi possível confirmar a eficiência da secagem como condição para a otimização dos separadores magnéticos a seco. Além disso, o estudo evidenciou que o controle granulométrico e a adaptação dos equipamentos às características mineralógicas do minério são fatores decisivos para o sucesso do processo de concentração magnética, contribuindo para o aumento da produtividade e da sustentabilidade na cadeia do minério de ferro.

O segundo estudo de caso foi dirigido ao reaproveitamento de rejeitos da usina de beneficiamento de minério de ferro da empresa Itaminas Comércio de Minérios S/A, localizada no município de Sarzedo, Minas Gerais.

O problema em estudo foi a perda excessiva de ferro em determinadas etapas do processo. Investigou-se a utilização de separadores magnéticos, em escala piloto, para diferentes etapas do processo.

Os ensaios conduzidos em planta piloto apresentaram resultados muito promissores. Foram obtidas melhorias expressivas nas recuperações metalúrgicas e no teor de ferro no concentrado, reduzindo assim as

perdas metálicas nos rejeitos e obtendo ganhos significativos de eficiência e sustentabilidade.

Portanto, foi possível demonstrar a grande versatilidade e eficiência dos equipamentos e processos de concentração magnética de minério de ferro. Os resultados apresentados demonstram que com ajustes operacionais, melhoria da tecnologia e ações de otimização dos processos é possível garantir a qualidade, benefícios e redução de custos de forma eficaz e sustentável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos docentes e discentes do Instituto de Engenharia, Ciência e Tecnologia (IECT) da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) - Campus Janaúba, pelo conhecimento técnico e acadêmico compartilhados.

REFERÊNCIAS

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

ALMEIDA, Diego C. Estudo de aproveitamento de rejeitos de minério de ferro por separação magnética. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – UFOP, 2013.

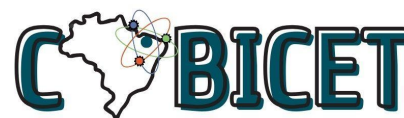
CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. Fundamentos da ciência e engenharia dos materiais: uma abordagem integrada. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARVALHO, B. C. Aproveitamento de minérios de ferro de baixo teor: tendências, tecnologias utilizadas e influências no sequenciamento de lavra. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Escola de Minas da Universidade de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto, 2012.

CARVALHO, F. M. S. Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o Brasil. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012.

CARVALHO, F. M. S.; OLIVEIRA, M. G.; SILVA, J. P. Minérios de ferro: geologia, mineralogia, tecnologia de beneficiamento e aproveitamento sustentável. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

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



CAXITO, Fabrício; DIAS, Tatiana Gonçalves. Ferro. In: PEDROSA-SOARES, Antônio Carlos; VOLL, Eliane; CUNHA, Edson Campos (org.). Recursos Minerais de Minas Gerais Online: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, e meio ambiente e mineração em minas gerais. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (Codemge), 2018. Cap. 10. p. 1- 36. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias/minerais/ferro/#principais-dep%C3%B3sitos-de-ferro-de-minas-gerais>. Acesso em: 02 de setembro de 2024.

CHAVES, Arthur Pinto. Teoria e prática do tratamento de minérios. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CHAVES, A. P.; & Chaves Filho, R. C. Separação magnética. In Chaves, A. P.; & Chaves Filho, R. C. Teoria e prática do tratamento de minérios: Separação densitária. (vol. 6). São Paulo: Oficina de Textos. 2013.

COSTA, F. J. Otimização do processo de concentração magnética da planta de ultrafinos da mina de Brucutu. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – UFMG, 2015.

GAUSTEC. WHIMS. Disponível em: <<https://gaustec.com/a-empresa/>>. Acesso em 22/06/2025. 2025.

GAUSTEC. G-3600. Disponível em: <<https://gaustec.com/2010/10/01/rem-2010-gx-3600-worlds-largest-magnetic-separator-up-to-800-tph/>>. Acesso em 22/06/2025. 2011.

INBRAS. Separador Magnético WDRE. Disponível em: <<https://inbras.com.br/separadormagnetico-de-tambor-de-alta-intensidade-via-umida-separador-wdre/>>. Acesso em: 20/06/2025. 2024.

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

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

METSO. Separadores Magnéticos de Baixa Intensidade (LIMS). Disponível em: <<https://www.metso.com/portfolio/lims-magnetic-separators/>>. Acesso em 23/06/2025. 2025.

ROCHA, Rafael Rodrigues. Estudo do processo de concentração magnética de alta intensidade na recuperação de finos de minério de ferro. TCC (Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

RODRIGUES, Guilherme Henrique Gualandi. Concentração magnética de alta intensidade (WHIMS) para rejeito de ferro com a tecnologia Super Bigflux® Gaustec Magnetic Technology [manuscrito]. 2022. 75 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, 2022.

SAMPAIO, Carlos H.; LUZ, Antônio B. Separação magnética e eletrostática. In: LUZ, Antônio B.; FRANÇA, Sílvia C. A.; BRAGA, Paulo F. A. (org.). Tratamento de minérios. 5. ed. p. 353–404. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

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

SAMPAIO, J. A. et al. Separação magnética e eletrostática. In: Tratamento de minérios. 6.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, Cap.8, p.341-379. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2180>. Acesso em: 22 de outubro de 2024. 2018.

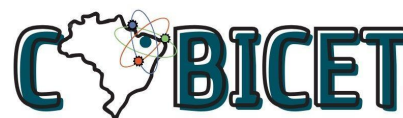
SANTOS, Priscilla Leão. Otimização da concentração de minério de ferro em usina de processamento mineral com secagem e concentração magnética [recurso eletrônico] / Priscilla Leão Santos. - 2024.

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

SILVA, Maximiliano Batista da. Separação magnética de ultrafinos hematíticos. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

SVOBODA, J. The Effect of Magnetic Field Strength on the Efficiency of Magnetic Separation. Minerals Engineering, Volume 7, p. 747-757, Sep. 1993.

SVOBODA, Jiří; FUJITA, Takashi. Recent developments in magnetic methods of material separation. Minerals Engineering, Oxford, v. 16, n. 9, p. 785–792, 2003.



TAKEHARA, L. Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração Sinter Feed. 2004. 421 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

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

VALE S.A. Palestra: Minas de minério de Ferro do Quadrilátero Ferrífero, ministrada por Marcelo Rodrigues. SEMINÁRIO DE PALESTRAS TÉCNICAS DA ENGENHARIA DE MINAS/UFVJM. 2021. Disponível em:
<https://www.youtube.com/watch?v=JXeZiZ1Zsy0>.
Acesso em: 02 setembro de 2024.

VALE S.A. Relatório de sustentabilidade e performance operacional – 2021. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://vale.com>. Acesso em: 20 jun. 2025.

WILLS, Barry A.; FINCH, James. Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 8. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015.