

Processamento mineral a seco: testes em laboratório com minério de ferro de depósito no sudoeste do quadrilátero ferrífero

Dry mineral processing: laboratory tests with iron ore deposits in the southwest of the iron quadrangle

DOI:10.34117/bjdv8n3-372

Recebimento dos originais: 27/01/2022

Aceitação para publicação: 28/02/2022

Fernando Duarte Amorim

Mestrado em Engenharia e Gestão de Processos e Sistemas pelo IETEC - MG
Vórtice Consultoria Mineral - Belo Horizonte - MG
Instituição: IETEC - Instituto de Educação Tecnológica
Endereço: Rua José Resende da Costa Filho, 487 – Inconfidentes, CEP: 36492-437
Belo Horizonte - MG
E-mail: fernando.amorim@vorticemineral.com.br

José Helvécio Martins

Ph.D. em Engenharia Agrícola pela Purdue University, Estados Unidos
Instituição: Instituto de Educação Tecnológica - IETEC - Belo Horizonte - MG
Endereço: Rua Didico Bonicontró, 93 - Fátima, CEP: 36572-152 - Viçosa - MG
E-mail: j.helvecio.martins@gmail.com

Aline Pereira Leita Nunes

Dra. em Tecnologia Mineral pela Universidade Federal de Minas Gerais
Instituição: Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM - Belo Horizonte - MG
Endereço: Rua Sergipe, 1440 - Savassi, CEP: 30130-174 - Belo Horizonte - MG
E-mail: alineplnunes@yahoo.com.br

RESUMO

Destacando-se na balança comercial brasileira, com exportações atingindo US \$ 14,3 bilhões no primeiro semestre de 2020 e saldo de US \$ 11,5 bilhões, o minério de ferro atingiu níveis promissores de produção em minas em operação, e atraindo investimentos em novas tecnologias de processamento. Os depósitos de minério de ferro a sudoeste do Quadrilátero Ferrífero no Estado de Minas Gerais, Brasil, possuem características mineralógicas que têm permitido a utilização do minério de ferro, a partir da utilização da separação magnética em circuitos totalmente secos, gerando produtos que são absorvidos pelo mercado, maximizando o aproveitamento das jazidas de minérios. Nesse contexto, o processamento mineral a seco para minério de ferro se expande de um fluxograma clássico de processamento mineral nas etapas de britagem e peneiramento, como opção também para a etapa de concentração. O processamento a seco é uma oportunidade de aproveitamento de minérios em regiões com baixa disponibilidade hídrica, onde os depósitos apresentam minérios com características magnéticas. Por outro lado, as operações a seco no beneficiamento do minério de ferro são mais comuns nas etapas de britagem e peneiramento, não sendo uma prática utilizada nas etapas de cominuição e concentração. Nesse contexto, este estudo demonstra os resultados de testes de processamento em uma rota de separação magnética completamente seca realizados em minérios de uma jazida localizada a sudoeste do Quadrilátero Ferrífero no estado de Minas Gerais, Brasil.

Palavras-chave: minério de ferro, processamento a seco, separação magnética, nova tecnologia.

ABSTRACT

Standing out in the Brazilian trade balance, with exports reaching US\$ 14.3 billion in the first half of 2020 and a balance of US\$ 11.5 billion, iron ore has reached promising levels of production in mines in operation, and attracting investments in new processing technologies. The iron ore deposits southwest of the Iron Quadrangle in the State of Minas Gerais, Brazil, have mineralogical characteristics that have allowed the use of iron ore, from the use of magnetic separation in totally dry circuits, generating products that are absorbed by the market, maximizing the use of mineral deposits. In this context, dry mineral processing for iron ore expands from a classic mineral processing flowsheet in the crushing and screening stages, as an option also to the concentration stage. Dry processing is an opportunity to use ores in regions with low water availability, where deposits have ores with magnetic characteristics. On the other hand, dry operations in iron ore beneficiation are more common in the crushing and screening steps, not being a practice used in the comminution and concentration steps. In this context, this study demonstrates the results of processing tests in a completely dry magnetic separation route performed on ores from a deposit located southwest of the Iron Quadrangle in the state of Minas Gerais, Brazil.

Keywords: iron ore, dry processing, magnetic separation, new technology.

1 INTRODUÇÃO

Os depósitos de minério de ferro a sudoeste do Quadrilátero Ferrífero - QF possuem características mineralógicas que vêm permitindo seu aproveitamento, a partir do uso da separação magnética em circuitos totalmente a seco, gerando produtos que são absorvidos pelo mercado, maximizando o aproveitamento destes depósitos.

Geralmente, em fluxograma clássico de processamento mineral as etapas de britagem e peneiramento são realizadas a seco, não sendo uma prática nas etapas de cominuição e concentração, que geralmente utilizam a água como meio facilitador (CHAVES; PERES, 2003).

Como opção tecnológica, a concentração do minério de ferro a seco via separação magnética tem sido utilizada em depósitos com baixa disponibilidade hídrica ou que possuem minerais de ferro com liberação e susceptíveis a um campo magnético auxiliando assim o enriquecimento para geração de produtos.

As grandes reservas de minério de ferro do depósito de Bakchar, na região de Tomsk, Rússia, utilizam tecnologia de separação magnética por via seca. Esta reserva caracteriza-se por litotipos compatíveis com tecnologia de processamento por separação magnética, e suas partículas possuem formato arredondado, facilitando a recuperação do ferro nelas contido e o enriquecimento dos concentrados. Além disso, constata-se a influência dos parâmetros de

separação magnética na recuperação do ferro contido e seu rendimento mássico (EZHOV; SHVALJOV, 2015).

Uma etapa de fundamental importância para a tomada de decisão na implantação de um circuito de concentração a seco, além do conhecimento geológico do depósito, são os testes realizados em escala de bancada e piloto. Neste trabalho foi analisado um dos testes realizados para a implantação de um circuito de processamento de minério de ferro na mina Serra dos Alemães, que realiza a lavra e o processamento do minério de ferro predominantemente formado por magnetitito e proporções de itabiritos silicosos. O minério fino gerado no processamento primário do circuito de britagem e peneiramento é destinado ao processo de concentração magnética totalmente a seco, produzindo produtos tipo Sínter Feed - SF destinado à indústria siderúrgica e diretamente aproveitado no processo de sinterização e/ou exportado.

A etapa de testes conduzida pela equipe interna do empreendimento, foi toda realizada no laboratório de processo da em presa INBRAS ERIEZ - IE, localizado no município de Diadema, SP. Este estudo tem como objetivo uma análise sumária de como os testes em escala de bancada e piloto foram conduzidos, juntamente com os resultados obtidos. e bancada e piloto no laboratório da IE em amostras de minério de ferro.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

O conhecimento das características de um determinado bem mineral é premissa fundamental na continuidade dos estudos tecnológicos, que embasam a modelagem de rotas de processamento e a viabilidade econômica de uma atividade industrial futura. Para que este bem mineral, quando extraído, seja denominado minério bruto - Run-of-Mine (ROM), sua exequibilidade econômica deve ser comprovada e atestada. A partir de pequenos fragmentos rochosos, denominados de amostras (devem representar em proporção um determinado bem mineral), estes são submetidos a uma sequência de métodos e técnicas de caracterização mineralógica, a fim de subsidiar a elaboração de rotas no processamento mineral (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2010).

O conhecimento mineralógico direciona a modelagem da rota de processamento, bem como o sequenciamento das operações unitárias e a aplicação da tecnologia necessária ao bem mineral para obtenção de concentrados. No Quadro 3 encontra-se um resumo dessas tecnologias de concentração mineral, de acordo com o tipo de minério e o mineral-minério a ser concentrado (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2010). A atuação de forças em uma partícula mineral é classificada, quando esta é exposta a um campo magnético como: força magnética, força

gravitacional, força de arraste hidrodinâmico e forças entre as próprias partículas (KAISER, 2009). Essas forças são a base para o desenvolvimento do processo de separação das partículas ferromagnéticas.

A separação magnética é uma técnica que não utiliza produtos químicos, podendo ser aplicada em processos por via úmida e em processos totalmente a seco. Por esta razão, é uma técnica que não causa danos ao meio ambiente, viabilizando seu uso em regiões desprovidas de recursos hídricos. Geralmente, a utilização desta tecnologia em processos a seco, é destinada a materiais mais grossos e materiais de granulometrias mais finas em processos via úmida (LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018).

A separação magnética no Brasil é aplicada na separação de minerais de hematita e quartzo, utilizando-se as diferentes respostas dos minerais quando submetidos à ação de um campo magnético (YANG, 1988), e com os avanços na tecnologia dos supercondutores em projetos e operações, ampliaram-se a diversidade e a possibilidade de aplicação desta tecnologia na área de processamento de minério (BEHARRELL, 2015). As principais aplicações industriais desta tecnologia encontram-se no Quadro 1.

Quadro 1 - Aplicações industriais da separação magnética

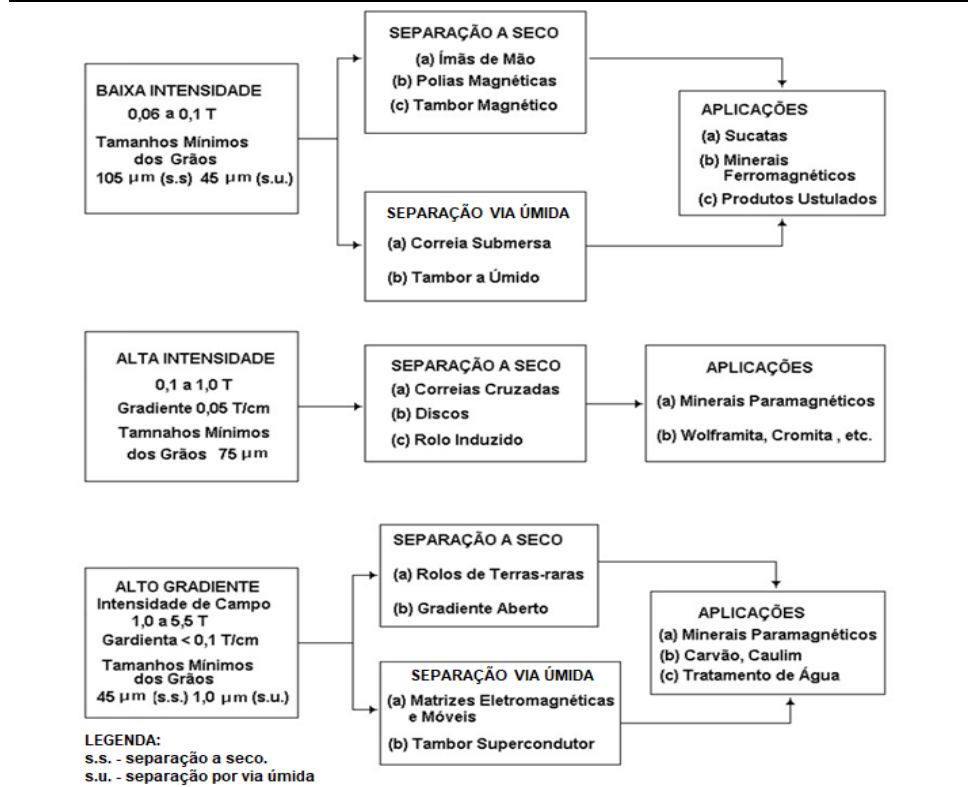
Tipo de minério/material	Exemplos	Tipo de Separador Magnético (SM)
Minério de ferro (paramagnético)	Hematita	SM de alta intensidade por via úmida, SM de alto gradiente, SM de ímãs permanentes de terras raras.
Magnetita	Taconito	SM de baixa intensidade (a seco ou por via úmida)
Areia de praia	Minerais pesados	SM de baixa intensidade, SM de alta intensidade por via úmida, SM de rolos induzidos, SM de alto gradiente, SM de ímãs permanentes de terras raras.
Argilominerais e talco	Caulinita e talco	SM de alto gradiente.
Materiais para carga	Carbonato de cálcio	SM de ímãs permanentes de terras raras (a seco).
Insumos para indústria de vidros e cerâmicas	Sílica, feldspato e nefelina sienito	SM de baixa intensidade, SM de alta intensidade por via úmida, SM de rolos induzidos, SM de alto gradiente, SM de ímãs permanentes de terras raras (a seco).
Insumos para indústria de refratários	Alumina, cromita e magnesita	SM de baixa intensidade, SM de rolos induzidos, SM de ímãs permanentes de terras raras (a seco).
Minerais metálicos não ferrosos	Minerais, sulfetados, Wolfranita e cassiterita	SM de alta intensidade por via úmida, SM de alto gradiente, SM de ímãs permanentes de terras raras (a seco).

Fonte: ARVIDSON; NORRGRAN, 2014

As categorias dos equipamentos de separação magnética, são definidas de acordo com a intensidade do campo magnético gerado a partir dos parâmetros: baixa intensidade, alta

intensidade, e alto gradiente, juntamente com sua aplicação em circuitos a seco e a úmido conforme Figura 1 (SAMPAIO; LUZ, 2004).

Figura 1 - Classificação dos equipamentos a partir da intensidade do campo magnético



Fonte: SAMPAIO; LUZ, 2004

Os equipamentos de separação magnética também podem ser classificados com base na intensidade de campo gerado nas categorias de baixa intensidade, em equipamentos com campo magnético de até 3.000 Gauss, e para alta intensidade, em equipamentos com campo magnético maior que 3.000 Gauss (WASMUTH; UNKELBACH, 1991).

2.1.1 Estudos e aplicações da separação magnética em processamento a seco

A separação magnética possui uma aplicação vasta no processamento de minerais, atendendo a uma diversidade de objetivos, de acordo com a característica dos materiais e a demanda industrial. Esta tecnologia possui aplicações em processos a seco e por via úmida, de acordo com as características da indústria e o contexto operacional, podendo ser usada tanto na obtenção de produtos magnéticos, a partir de minerais susceptíveis a um campo magnético permanente, quanto na retirada de impurezas de outros produtos.

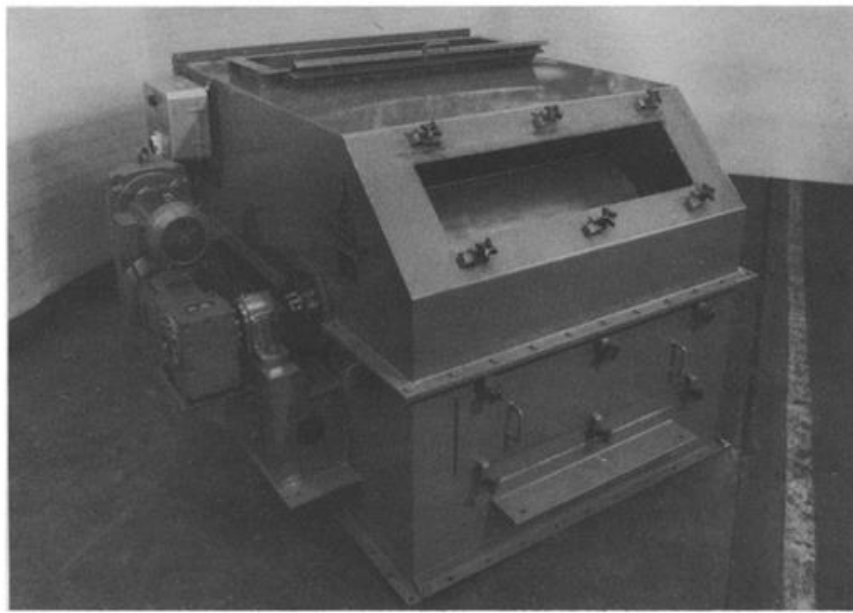
O conceito de que a diferença de susceptibilidade dos materiais é a principal propriedade explorada na separação magnética e suas inúmeras aplicações é evidenciado por Wasmuth e

Unkelbach (1991). Esses autores relatam também, já naquela época, os avanços tecnológicos obtidos na separação magnética, referente ao aumento da intensidade e gradiente magnético dos ímãs.

Vale ressaltar o desenvolvimento de uma configuração magnética para tambores magnéticos aplicados na separação a seco, que proporciona a diminuição do uso de materiais magnéticos em sua construção e um circuito magnético com maior força magnética e uniformidade de campo. Esta configuração denominada Separador de Ímã Permanente (SIP) para minério ou *Permanent Magnet Separator* (PERMS), está ilustrado na Figura 2 e possui as seguintes vantagens (WASMUTH; UNKEELBACH, 1991):

- a) estabelecimento de um campo magnético de 700 gauss dentro da superfície de trabalho do separador;
- b) uniformidade do valor absoluto do campo na superfície do cilindro do separador, de modo que as forças tangenciais que obstruem um transporte contínuo das partículas ao longo da superfície do cilindro são substancialmente evitadas;
- c) existência de polos magnéticos norte e sul, alternadamente, ao longo da superfície do tambor, de modo que as partículas com um momento magnético permanente são revertidas dentro de seu campo, permitindo que as partículas não magnéticas sejam liberadas;
- d) aplicação em uma ampla faixa, devido à combinação do gradiente radial do campo magnético combinado com requisitos específicos.

Figura 2 - Separador magnético de ímã permanente para separação de minério a seco

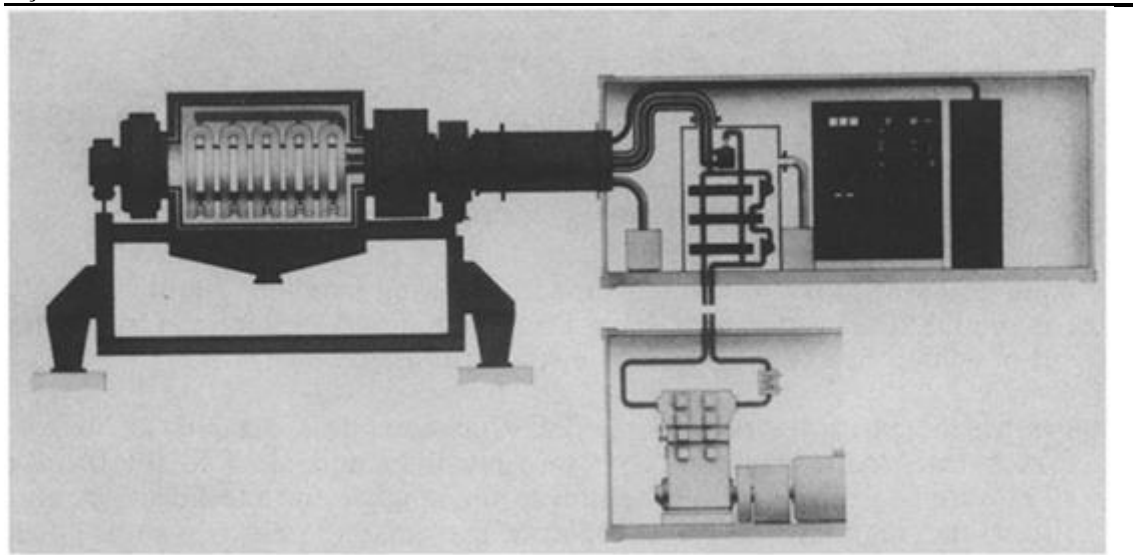


Fonte: WASMUTH; UNKEELBACH, 1991

Também são relatados avanços obtidos a partir da utilização de um tambor magnético de gradiente aberto aplicado industrialmente, com sistema de supercondutor (FIGURA 3), que promove o aumento do campo magnético e da faixa de aplicação em circuitos a seco (WASMUTH; UNKEELBACH, 1991).

Pode-se constatar que existem várias opções de equipamentos com diversidade tecnológica que proporcionam à indústria mineral condições de avanços no enriquecimento de seus produtos e ou subprodutos. Esta tecnologia se apresenta como uma opção viável em regiões com escassez de recursos hídricos, de seus depósitos de minério de ferro demandarem processos com tecnologia de concentração para a obtenção de produtos comercializáveis.

Figura 3 - Tambor magnético de gradiente aberto com sistema de supercondutor, aplicado industrialmente na separação de minério



Fonte: WASMUTH; UNKEELBACH, 1991

Uma análise da separação magnética de alto gradiente, utilizada pela indústria na recuperação de materiais com matrizes ferromagnéticas fracas, no beneficiamento de argilas e caulim, no tratamento de água, e na dessulfurização do carvão, dentre outros processos, encontra-se em Li *et al.* (2018).

A força de atração aumenta à medida que as partículas se encontram mais próximas da superfície da matriz magnetizada, de forma a capturar as partículas fracamente magnéticas, tornando como principal alvo da separação magnética de alto gradiente as partículas de baixa susceptibilidade magnética. Em aplicações de separação a seco, não são consideradas as forças de arraste devido à presença de partículas mistas, em que o mineral está associado em uma mesma partícula que a ganga. A força de atração magnética que atua sobre a partícula mineral, é descrita como:

$$F_m = \frac{1}{\mu_0} (k_p - k_f) \cdot V_p \cdot B \cdot \nabla B \quad (1)$$

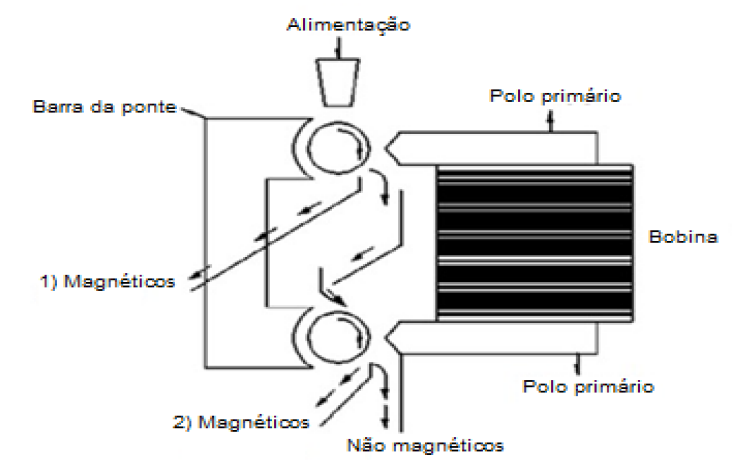
em que:

- V_p = Volume da partícula magnetizável, [m^3];
- B = Campo magnético, [T];
- ∇B = Gradiente do campo magnético, [T/m];
- μ_0 = permeabilidade magnética do vácuo, [$T \cdot m/A$];
- k_p = Constante da partícula;
- k_f = Constante do fluido.

Apesar de os estudos de separação magnética terem sido direcionados para separação via úmida, o conceito de atração da partícula magnética em um meio fluido pode servir de base para o entendimento do arraste de partículas de ganga e para a demanda por estratificação destas partículas em processo de separação a seco.

Zong, Fu e Bo (2018) estabeleceram uma classificação para os separadores magnéticos, a partir de seu desenho, dividindo-os como Separadores Magnéticos de Correia Cruzada (SMCC) - *Magnetic Cross Belt Separators* (MCBS), Separador Magnético de Rolo de Indução (SMRI) - *Magnetic Induction Roller Separator* (MIRS) (Figura 4), Separador Magnético de Ímã Permanente (SMIP) - *Permanent Magnet Separator* (PERMS), e Separador Magnético de Terras Raras (SMTR) - *Rare Earth Magnetic Separator* (REMS).

Figura 4 - Separador magnético de rolo de indução



Fonte: ZONG; FU; BO, 2018

Esses equipamentos são utilizados no processamento a seco de materiais magnéticos e seus princípios construtivos são utilizados nos demais equipamentos, variando a tecnologia aplicada para a geração do campo magnético. Podem também ser utilizados para analisar as variáveis que afetam o desempenho do processo de separação magnética e classificá-las em termos de variáveis operacionais, que estão ligadas diretamente ao modo de operação do circuito de processamento, juntamente com as características da matéria prima e as variáveis de projeto ou de engenharia da máquina. Como variáveis operacionais destacam-se: taxa de alimentação do circuito, intensidade do campo magnético, velocidade de rotação do rotor e a posição dos divisores de fluxo. No projeto da máquina, destacam-se a forma do polo magnético e o diâmetro do rotor.

Além das variáveis já mencionadas, citam-se as variáveis referentes à matéria-prima, como a susceptibilidade magnética do mineral; o tamanho, a forma e a massa específica da partícula, que são fundamentais para o desempenho adequado do processo de separação magnética. Estudos relatam a influência da massa específica da partícula e sua susceptibilidade magnética como fundamentais na obtenção dos produtos resultantes do processo de separação, o que afeta diretamente o desempenho da separação (ZONG; FU; BO, 2018).

A separação magnética de alta intensidade a seco tem sido objeto de estudos utilizando equipamentos com tecnologia desenvolvida mais recentemente, procurando situar o atual estágio de aplicação dessa tecnologia e seus desafios. É relatado que as diversas aplicações estão condicionadas à diferença de susceptibilidade magnética entre o mineral e sua ganga como propriedade concentradora (TRIPATHY *et al.*, 2017a; TRIPATHY *et al.*, 2017b). A classificação das partículas minerais em ferromagnéticas, diamagnéticas e paramagnéticas já foi apresentada e comentada em seções precedentes (KARMAZIN, 1997, MORGAN; BRONKALA, 1991; WILLS; MUNN, 2006, IYER, 2011; BROEK, 1995; MOSTIKA *et al.*, 1999; RAO, 2011).

Os melhores desempenhos de separadores magnéticos a seco de alta intensidade estão associados à existência de partículas ferromagnéticas no material, porque estas partículas são atraídas fortemente quando submetidas a um campo magnético. Então, têm surgido novas abordagens e conceitos na melhoria no desenho e na modelagem do processo de separação utilizando separadores mais eficazes. O desempenho de vários equipamentos de concentração magnética, a seco, tem sido analisado, juntamente com diversos tipos de minerais submetidos a um campo magnético (TRIPATHY *et al.*, 2017a).

A vantagem do uso da separação magnética em circuitos a seco no processamento mineral é clara, devido à baixa demanda energética e não demanda de recursos hídricos, além, conseqüentemente, de não necessitar da construção de barragens de rejeito e de preocupação com

o reuso e qualidade da água. Porém, o processamento por via úmida apresenta melhor desempenho na recuperação de materiais de granulometria mais finas e materiais diamagnéticos (TRIPATHY *et al.*, 2017b).

3 METODOLOGIA

Os testes para verificação das respostas nas amostras de minério bruto da Vórtice Consultoria Mineral - VCM a partir do uso da separação magnética no processamento a seco foram realizadas no laboratório da IE em quatro etapas, conforme o Quadro 2. Estes dados serviram para caracterizar os minérios disponíveis para processamento, desenvolver uma rota de processamento com baixo risco operacional e econômico, e maximizar a curto prazo o aproveitamento dos minérios já extraídos.

Quadro 2 - Etapas da pesquisa para modelagem do sistema de separação de materiais finos (MF) na Unidade de Britagem e Peneiramento (UBP)

Evento	Etapas	Procedimento	Granulometria (G) (mm)
1	Granulometria química	Análise química e física	
2	Caracterização mineralógica	Fotomicrografia em lâminas por seção polida nas amostras.	
3	Teste de bancada	Separação magnética usando ímãs de mão. Campo magnético: 1.500 gauss, 3.000 gauss e 7.000 gauss.	6,3 < G < 8,0 3,0 < G < 6,3 1,0 < G < 3,0 1,0 < G < 2,0 G < 1,0
4	Teste piloto	Separação magnética piloto em tambores. Campo magnético: 1.500 gauss, 2.500 gauss e 7.000 gauss.	

3.1 TESTES DE BANCADA

Os testes iniciais de bancada foram essenciais para entender as respostas do minério com susceptibilidade magnética quando submetido a um campo magnético, nos processos de enriquecimento e recuperação em massa. Estes testes foram realizados utilizando ímãs permanentes de mão, com intensidade de campo de 1.500 gauss, 3.000 gauss e 7.000 gauss, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Imãs de mão utilizados nos testes de bancada - Etapa 1



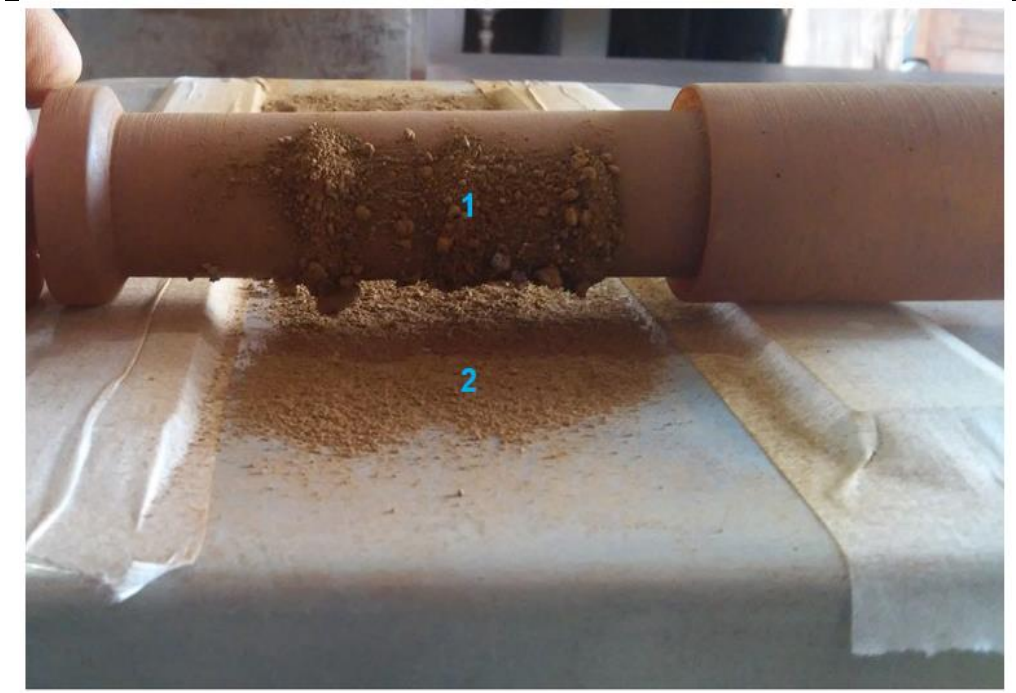
Fonte: VCM, 2020¹

A Figura 6 mostra uma lâmina de material com massa conhecida delimitada na bancada de testes na posição horizontal. Depois do espalhamento uniformemente do material, o imã de mão foi rolado sobre as amostras de minério a partir da altura de 10 mm. O resultado é mostrado na Figura 6, em que a massa susceptível atraída pelo campo do imã (número 1 na Figura 6) era descarregada em um recipiente com um esforço manual, limpando a superfície do imã. A massa não susceptível (número 2 na Figura 6) era submetida ao campo de um imã na sequência. Todas as massas resultantes foram pesadas em balança de precisão e encaminhadas para análise química.

A sequência de testes da primeira parte é mostrada no fluxograma na Figura 7. O estágio de desbaste (*rougher*) foi realizado usando um campo magnético de 1.500 gauss, que gerou um produto magnético considerado como produto 1. O material não magnético foi submetido a um imã de 2.500 gauss, simulando o estágio de reaproveitamento do material não magnético em 1.500 gauss (*scavenger 1*). Neste estágio, o produto magnético foi considerado como produto 2 e o material não magnético foi submetido a um imã de 7.000 gauss (*scavenger 2*), simulando o estágio de reaproveitamento 2. No estágio de reaproveitamento 2, o produto magnético foi considerado como produto 3 e o material não magnético considerado como rejeito final.

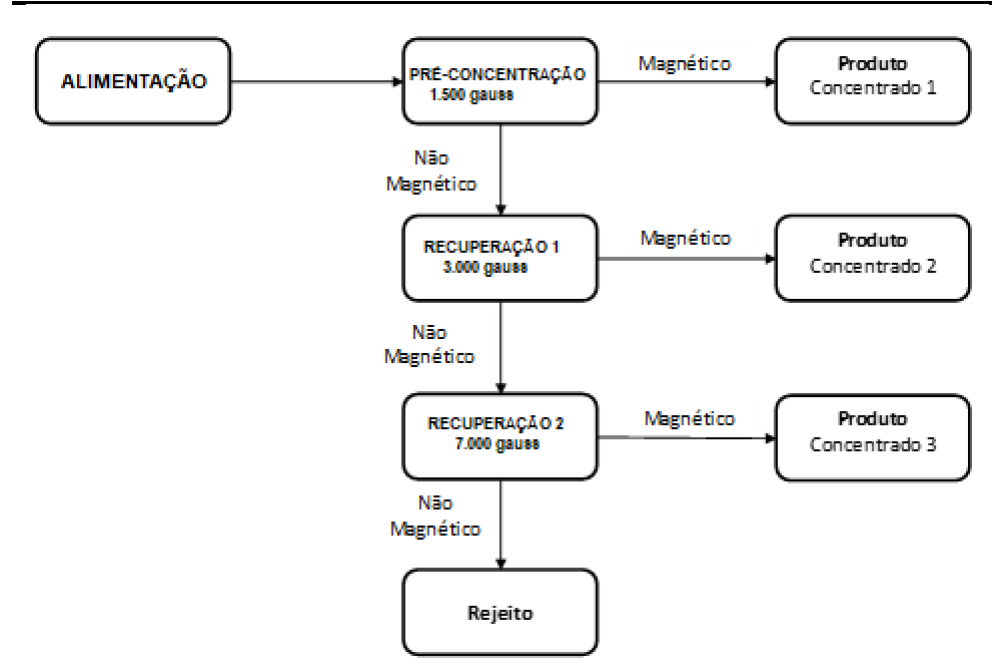
¹ Foto obtida *in loco* com autorização da diretoria da VCM.

Figura 6 - Realização de teste de bancada – Primeira parte



Fonte: Fonte: VCM, 2020²

Figura 7 - Fluxograma de teste de bancada - Primeira parte



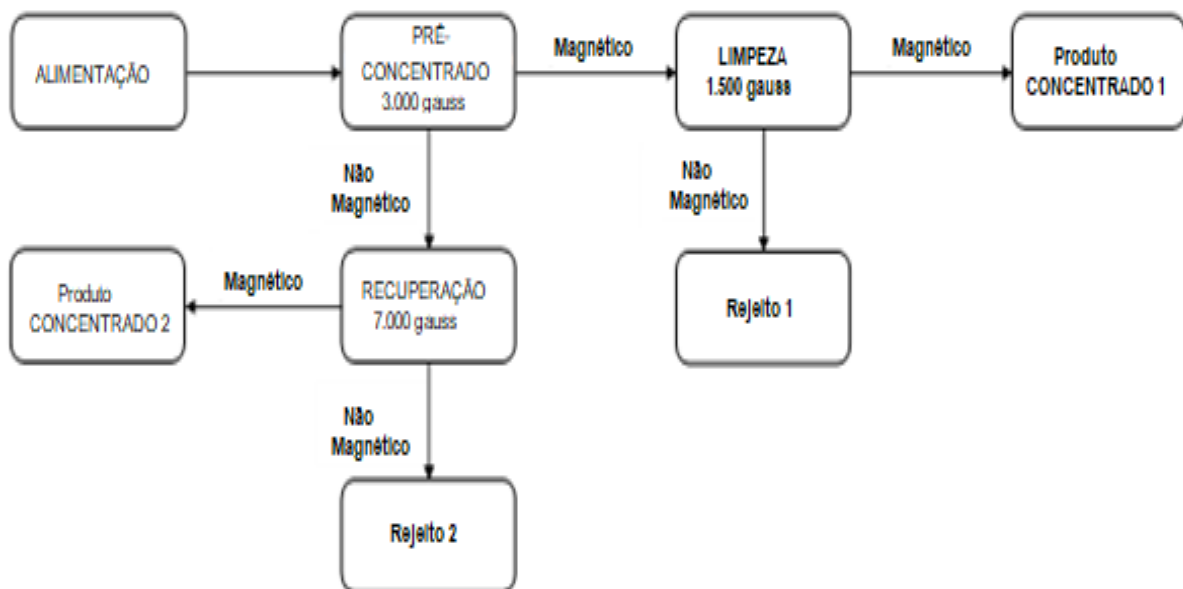
Os testes da segunda etapa foram realizados de acordo com o fluxograma da Figura 8, elaborado com base nos resultados da primeira parte.

² Foto obtida *in loco* com autorização da diretoria da VCM.

Nessa etapa foram testados o estágio de pré-concentração em 3000 gauss, que gerou um produto magnético que foi submetido a um estágio de limpeza em 1.500 gauss. No estágio de limpeza, o material magnético foi considerado como produto 1 e o material não magnético considerado como rejeito 1. O material não magnético do estágio de pré-concentração em 3.000 gauss, foi submetido a um ímã de 7.000 gauss simulando o estágio de recuperação. O material magnético susceptível ao campo de 7.000 gauss foi considerado como produto 2 e o material não magnético em 7.000 gauss considerado o rejeito 2 desta etapa.

Os resultados da segunda parte (Etapa 2) foram satisfatórios, indicando a viabilidade dos testes em escala piloto, apesar de não terem sido disponibilizados pela empresa Vórtice Consultoria Mineral.

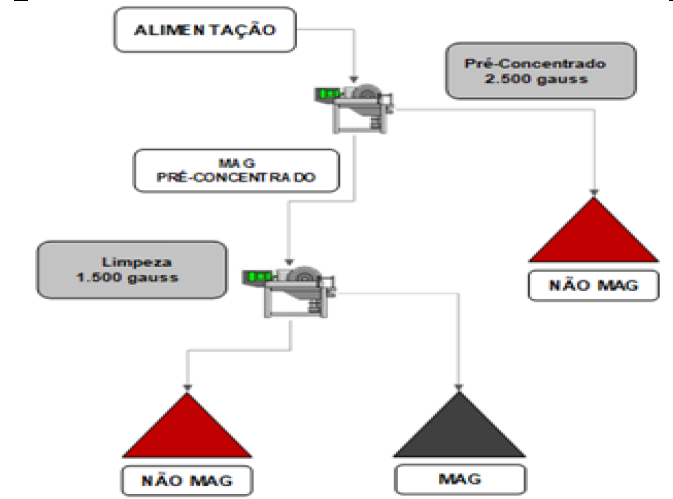
Figura 8 - Fluxograma de teste de bancada - Etapa 2



3.2 TESTES PILOTO

Os materiais finos (MF) foram caracterizados por meio de amostras representativas coletadas em duas etapas: (1) amostragem em pilhas de MF armazenadas de processamentos antigos dispostas ao longo do empreendimento; (2) amostragem dos materiais finos (MF) gerados durante a operação da Usina de Britagem e Peneiramento - UBP. A síntese do plano de trabalho (10 testes) encontra-se no esquema da Figura 9. Estas amostras apresentaram uma umidade média de 4,0%.

Figura 9 - Fluxograma esquemático inicial para testes de separação magnética a seco



Todos os testes piloto foram realizados no laboratório da empresa INBRAS³, na cidade de Diadema, SP, utilizando os seguintes equipamentos:

a) tambor magnético piloto de 1.500 gauss de 12", modelo HF-1500, de baixa intensidade (Figura 10).

Figura 10 - Tambor magnético de 1.500 gauss de 12", modelo HF-1500



Fonte: Fotografia obtida *in loco*⁴, 2017

b) tambor magnético piloto de 2.500 gauss de 12", modelo HFRE-2.500, de baixa intensidade (Figura 11).

³ A menção do nome de uma empresa neste trabalho não significa, necessariamente, qualquer envolvimento com a empresa citada.

⁴ Foto obtida *in loco* com autorização da diretoria da empresa INBRAS

Figura 11 - Tambor magnético de 2.500 gauss de 12", modelo HFRE-2500



Fonte: Fotografia obtida in loco⁵, 2017

c) Tambor magnético piloto de 7.000 gauss de 36", modelo HFRE-7000, de alta intensidade (FIGURA 12).

Figura 12 - Tambor magnético de 7.000 gauss de 36", modelo HFRE-7000



Fonte: Fotografia obtida in loco⁶, 2017

A utilização desses equipamentos em escala piloto possibilitou mapear as melhores respostas de recuperação e enriquecimento referente ao minério alimentado, o que foi essencial para identificar o tipo de modelagem de processo mais adequada ao sistema.

Na Figura 13 encontra-se ilustrada uma das etapas de testes em que o material foi submetido, inicialmente, a um campo magnético de 2.500 gauss. Diferentemente do processamento por via úmida, a coloração do minério não assume um aspecto mais escuro nos concentrados, devido a uma fina camada que se mantém sobre os grãos, que não é retirada sem a utilização da água.

⁵ Foto obtida *in loco* com autorização da diretoria da empresa INBRAS

⁶ Foto obtida *in loco* com autorização da diretoria da empresa INBRAS

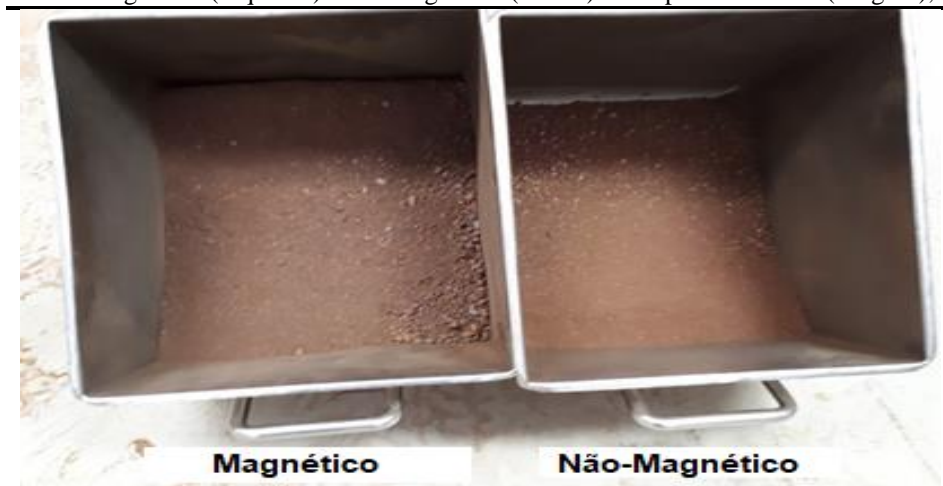
Figura 13- Teste de separação magnética na etapa de desbaste (rougher) com um campo de 2.500 gauss



Fonte: Fotografia obtida *in loco*⁷, 2017

Na Figura 14 observa-se a característica visual de cada um dos produtos obtidos quando a amostra foi submetida a um campo de 2.500 gauss. A amostra no recipiente à esquerda é o produto magnético, cuja coloração ficou mais escura, e o recipiente à direita contém o produto não magnético nesta etapa. Esse teste serviu para realizar um escalpe de toda magnetita da amostra, obtendo um pré-concentrado para alimentar uma rota de limpeza posteriormente. Os dados foram obtidos dotando o circuito de um dispositivo que garantisse, em duas etapas, a geração de concentrados sintetizados na alimentação (SF) enriquecidos com Fe e SiO₂, compatível a sua comercialização.

Figura 14 - Produto magnético (esquerda) e não magnético (direita) na etapa de desbaste (rougher), a 2.500 gauss



Fonte: Fotografia obtida *in loco*⁸, 2017

⁷ Foto obtida *in loco* com autorização da diretoria da empresa INBRAS

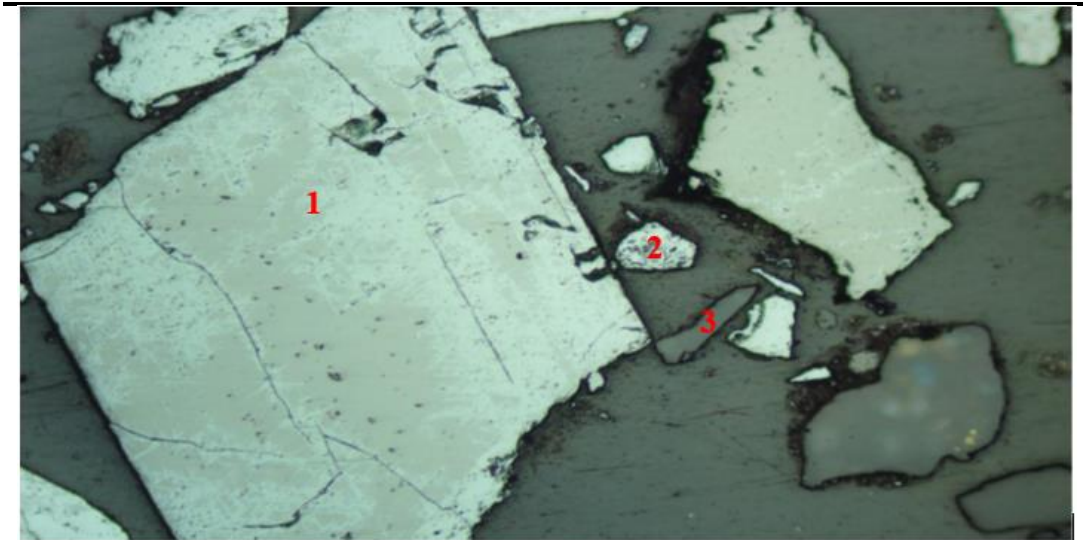
⁸ Foto obtida *in loco* com autorização da diretoria da empresa INBRAS

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a caracterização mineralógica feita por meio de fotomicrografia em lâminas por seção polida nas amostras de materiais finos (MF) oriundos da UBP, foi determinado que a proporção de minerais magnéticos na amostra do minério era caracterizada por um aglomerado de minerais de magnetita, martita e hematita, com proporção de 72,6% em massa e 60,4% em área, conforme mostrado na Figura 13, enquanto o quartzo livre apresentou uma proporção de 16,3% em massa e 26,8% em área. Esta matriz de minerais favoreceu a continuidade do trabalho direcionado para a separação magnética.

Na lâmina mostrada na Figura 15 foram observadas partículas constituídas de magnetita em processo de (1) martitização, (2) quartzo inteiro e (3) hematita recristalizada.

Figura 15 - Fotomicrografia da amostra de materiais finos (MF) da UBP. (Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva de 10x, ocular de 10x e zoom da câmera de 4x)



Fonte: VCM, 2020

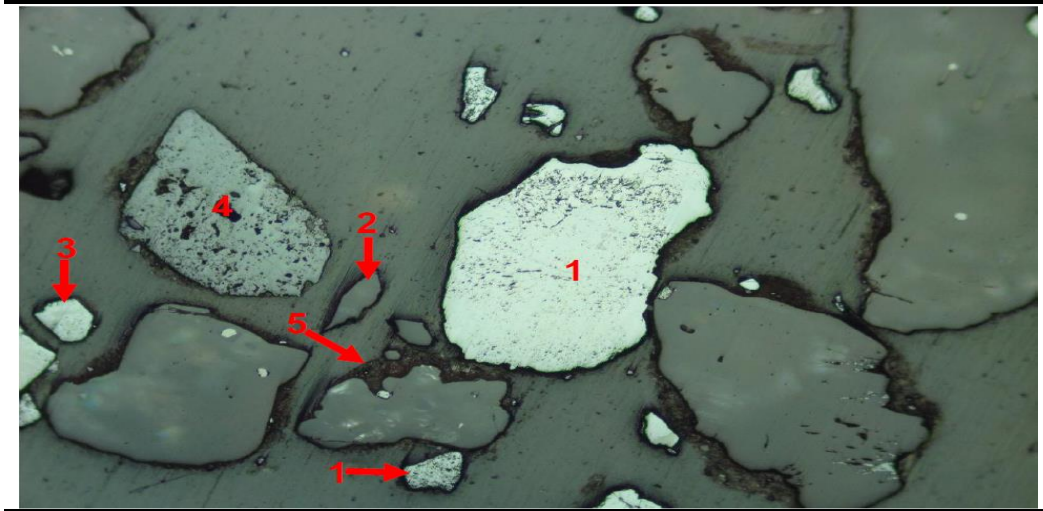
Em outra lâmina analisada (FIGURA 16), a participação mineralógica entre minerais de magnetita, martita e hematita foi de 61,9% em peso e de 46,9% em área. O quartzo livre apresentou proporção de 29,1% em peso e 43,6% em área.

Em relação à textura do minério (FIGURA 16), foram observadas partículas constituídas de hematita (1) martítica, (2) quartzo inteiro, (3) hematita recristalizada, (4) goethita botrioidal, e (5) quartzo recoberto por goethita terrosa (lama).

A alta proporção de minerais magnéticos, tendo vista que o principal contaminante era a sílica (SiO₂) oriunda do quartzo livre, potencializou a continuidade do estudo visando a implementação da tecnologia de separação magnética, haja vista a existência de tecnologia de

processamento a seco com aplicação industrial. Outro aspecto relevante é a menor tendência de arraste da sílica, devido à baixa susceptibilidade magnética do quartzo.

Figura 16 - Fotomicrografia amostra retirada da pilha de sobras



Fonte: VCM, 2020

Uma situação detectada e monitorada durante os testes foi a variação média do percentual de água das amostras entre 4% e 6%, que pode causar um efeito de arraste de minerais contaminantes no concentrado, principalmente SiO_2 . Além disso, como os teores médios dos principais contaminantes de SiO_2 e Al_2O_3 , foram 30% e 3%, respectivamente, conclui-se que os minerais de ganga eram, em sua grande maioria, oriundos de rochas de silicatos. Isto permitiu que o processo de concentração não fosse prejudicado por aglomerações minerais ocasionadas pelo percentual de água, em conjunto com argilominerais, e que os grãos destes minerais se estratificassem com maior facilidade.

A fração granulométrica retida em peneira com malha de 1,0 mm foi maior que 50%, em média, facilitando a geração de matéria-prima SF destinada à alimentação da sinterização, devido este ser um pré-requisito granulométrico exigido por siderúrgica que consomem este tipo de produto no mercado interno.

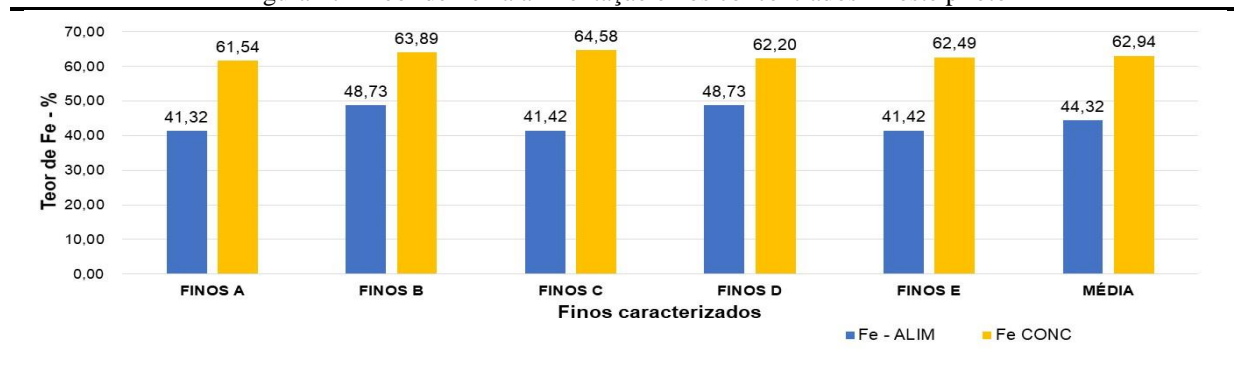
Outro fator importante para que o processo de separação magnética fosse implantado foi o teor médio de FeO , em torno de 4 %, mostrando que era representativo os minerais de magnetita que compunham o minério MF descartado na UBP e potencializando como alvo dos estudos de concentração totalmente a seco.

4.1 RESULTADOS DOS TESTES

Apesar de não ter sido disponibilizados os resultados dos testes de bancada, a partir da análise dos testes piloto, percebe-se sua viabilidade na continuidade do processo.

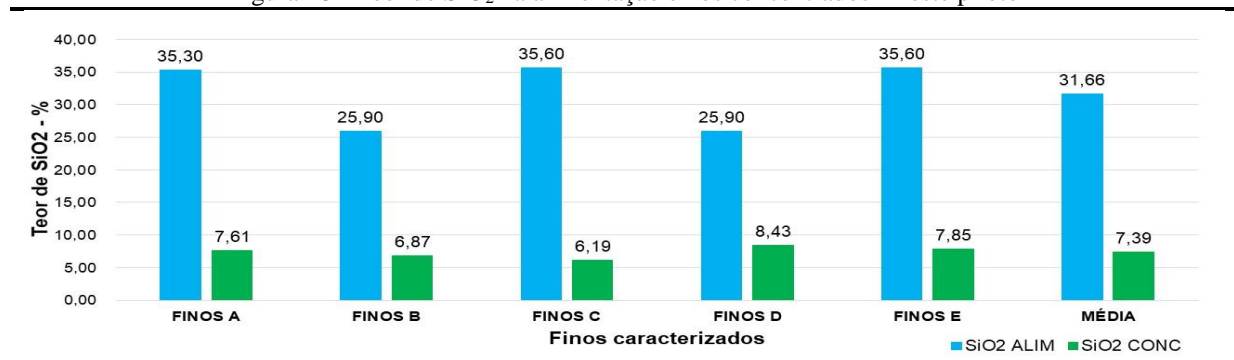
Observa-se na Figura 17 que o teor de Fe nas amostras submetidas ao teste piloto apresentou resultados equilibrados, com uma média de 62,94% no concentrado, frente a uma alimentação média de 44,32%. Este resultado foi prejudicado pelos materiais finos na amostra A, com um teor médio de Fe de 61,54%. A razão de enriquecimento média obtida nestes testes foi de 1,42, que apesar da variação do teor de Fe na alimentação, indica que os resultados estão de acordo com a premissa inicial.

Figura 17 - Teor de Fe na alimentação e nos concentrados - Teste piloto



A Figura 18 contém os resultados do teor de sílica (SiO_2) presente nos materiais finos testados. O teor médio de na alimentação foi de 31,66% e o valor máximo detectado nas amostras foi de 35,60%, mostrando uma boa proximidade entre o teor médio e o teor máximo. Observa-se que o teor de sílica diminuiu para níveis aceitáveis, de acordo com o mercado, oscilando entre o mínimo de 6,19% e máximo de 8,43%, com uma média SiO_2 no concentrado 7,39%.

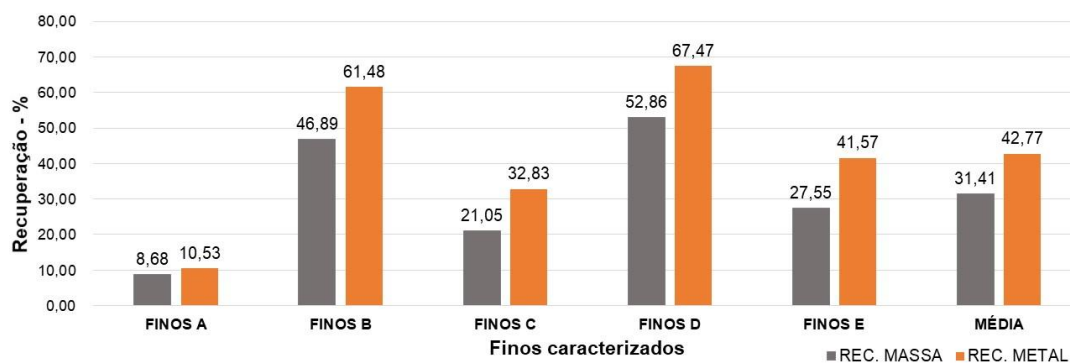
Figura 18 - Teor de SiO_2 na alimentação e nos concentrados - Teste piloto



A Figura 19 contém os resultados da recuperação em massa e metalúrgica, que apresentaram grande variação devido à mudança de parâmetros durante os testes. Estes

parâmetros não foram determinados e são relativos à variação de rotação dos equipamentos piloto, teor FeO e percentual de água nas amostras. Os resultados apresentaram uma recuperação média em massa de 31,41% e metalúrgica de 42,77%, conforme pode-se observar na Figura 19.

Figura 19 - Recuperação em massa e metalúrgica - Teste piloto



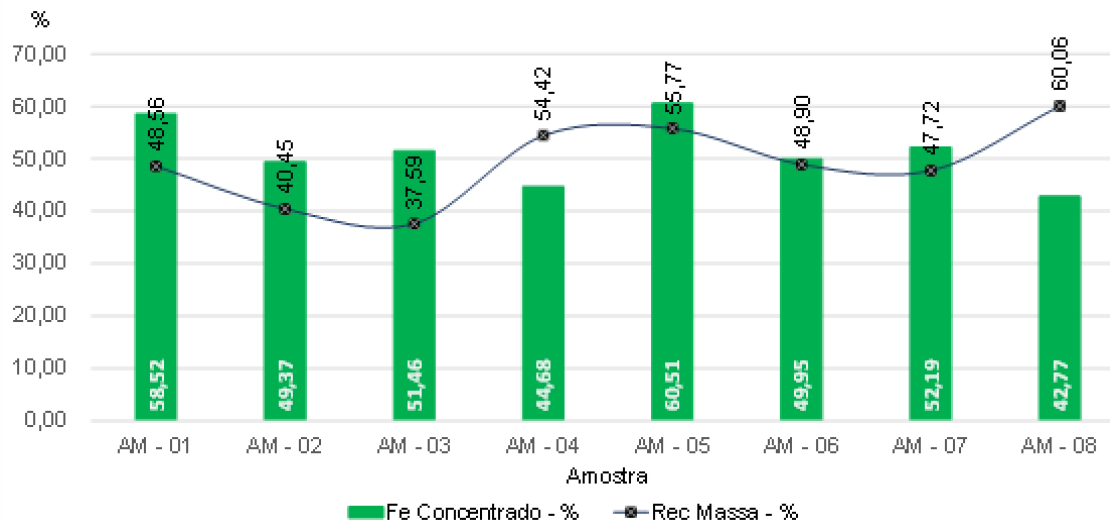
Os parâmetros técnicos para os cálculos de viabilidade econômica para a implantação do circuito de concentração magnética, juntamente com os dados de caracterização, definidos com base nos resultados dos testes de bancada e testes piloto, estão sumarizados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados obtidos nas etapas de testes e projeção industrial considerada

Parâmetro	Resultados obtido (%)	Projeção industrial (%)
Teor de Fe no concentrado Final	62,94	60,0
Teor de SiO ₂ no concentrado final	7,39	10,0
Recuperação em massa no concentrado	31,41	30,0
Recuperação metalúrgica	42,77	35,0
Percentual de água	4,50	6,0

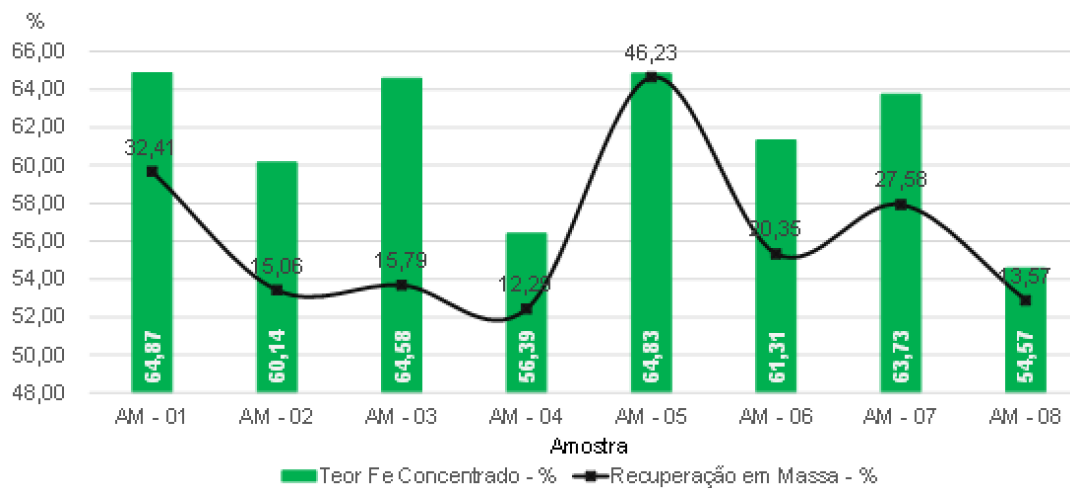
Foram realizados testes de separação magnética para confirmação de parâmetros na etapa de pré-concentração (*rougher*), de acordo com a Tabela 2, cujos resultados estão apresentados na Figura 20. Estes resultados confirmaram que nas amostras com maior volume de materiais finos estocados, o teor de Fe na etapa de limpeza (*cleaner*), baixa densidade, variou de 49,37% a 58,52%, e a recuperação em massa variou de 37,59% a 55,47%, conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20 - Resultado dos testes de separação magnética e confirmação de parâmetros – Etapa de pré concentração (rougher)



Os resultados referentes à etapa de limpeza (*cleaner*), apresentados na Figura 21, mostram a possibilidade de obtenção de um produto magnético na etapa piloto com teor de Fe variando de 54,57% a 64,87% e recuperação em massa variando de 12,29% a 46,23%. Os baixos valores de recuperação em massa nas amostras 02, 03, 04 e 08 estão associados à diminuição do teor de FeO nestas amostras.

Figura 21 - Resultado dos testes de separação magnética e confirmação de parâmetros – Etapa de limpeza (cleaner)



5 CONCLUSÕES

Os resultados dos testes demonstram viabilidade na implantação de uma rota de processamento totalmente a seco via separação magnética para os tipos de minérios testados. O concentrado final apresentou teores de Fe médio em condições favoráveis para compor a mistura de composição (*blending*) para o produto SF do empreendimento, juntamente com o teor de SiO_2 inferior a 8,43%. Então, uma estratégia de mistura (combinação) dos materiais finos foi elaborada para que o circuito seja alimentado, garantindo a produção de concentrados com teores de Fe maior que 58 %. Além disso, outro fator estratégico para a tomada de decisão foi a geração de produtos não magnéticos na etapa de pré-concentração (*rougher*) com teor de Fe menor que 42 %, indicando condições adequadas para aproveitamento em uma futura rota de limpeza (*scavenger*), no estágio 3 do processo de separação.

Nota-se que o desempenho médio de enriquecimento de Fe foi de 64,50% nas amostras de finos 01, 04, 05 e 07 com desempenho médio de recuperação em torno de 38,0%, sendo satisfatório inicialmente. Os testes não exploraram os impactos que podem ser causados pela umidade superior a 4,5% que podem estar presente na alimentação do material. O circuito não prevê inicialmente etapas de secagem para o processamento. Outro aspecto não discutido, e de fundamental importância será o entendimento do comportamento do minério alimentado com variações no percentual de umidade e FeO das amostras, devido esta variação estar associada com a presença de materiais magnéticos.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, F. A. **Processamento de minério de ferro a seco: estudo de caso a sudoeste do Quadrilátero Ferrífero**. 2020. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos e Sistemas) - Instituto de Educação Tecnológica, Belo Horizonte, 2020.
- ARVIDSON, B. R.; NORRGRAN, D. Magnetic separation. *In*: ANDERSON, C. G.; DUNNE, R. C.; UHRIE, J. L. **Mineral processing and extractive metallurgy: 100 years of innovation**. Englewoos, Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2014.
- BEHARREL, P. A. **Applications of superconducting magnetic separation**. San Diego, USA: Corporate Headquarters, 2015.
- BROZEK, M. The distribution of magnetic susceptibility in crushed ores. **Magnetic and Electrical Separation**, Amsterdam, v. 6, p. 213-228, 1995. Disponível em: <https://downloads.hindawi.com/archive/1995/052319.pdf>. Acesso em: 8, nov. 2019.
- CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem**. São Paulo: Signus, 2003. v. 3.
- EZHOV, A. M.; SHVALJOV, Y. B. Dry magnetic separation of iron ore of the Bakchar deposit. *In*: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE “CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING IN XXI., CENTURY, 16., 2015, Tomsk, Russia. **Procedia Chemistry [...]**. Tomsk, Russia: Elsevier Procedia, 2016. v. 15, p. 160-166.
- IYER, P. V. Magnetic and electrostatic separation. *In*: DARLING, P. (ed.) **SME Mining Engineers Handbook**. 3rd ed. Englewoos, Colorado, USA: Society of Mining, Metallurgy and Exploration, 2011.
- KAISER, W. **Rotas de processo para concentração de minérios itabiríticos e hematíticos da Mina de Fábrica**. 2008. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2008.
- KARMAZIN, V. V. Theoretical assessment of technological potential of magnetic and electrical separation. **Magnetic and Electrical Separation**, Moscow, v. 8, p. 139-159, 1997.
- LI, W.; HAN, Y.; XU, R.; GONG, E. **A preliminary investigation into separating performance and magnetic field characteristic analysis based on a novel matrix**. Shenyang, China: School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, 2018.
- LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM: MCTIC, 2018.
- MORGAN, D. G.; BRONKALA, W. J. The selection and application of magnetic separation equipment: Part I. **Magnetic and electrical separation**. v. 3. p. 5-16, 1991. Disponível em: <https://downloads.hindawi.com/archive/1991/026791.pdf>. Acesso em: 15, nov. 2019.
- MOSKITA, Y. S.; KARMAZIN, V. I.; SHUTE, V. Y.; GREBENYUK, L. Z. About the equations of motion of a magnetic particle in a magnetic separator. **Magnetic and Electrical Separation**.

Ukraine, v. 10, p. 35-44, 1999. Disponível em: <https://downloads.hindawi.com/archive/1999/056186.pdf>. Acesso em: 12, nov. 2019.

RAO, D. V. S. **Magnetic separation, mineral beneficiation**: a concise basic course. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2011.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios**: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM: MCT, 2010.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B. **Separação magnética e eletrostática**. 4. ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2004. p. 305-335.

TRIPATHY, S. K.; BANERJEE, P. K; SURESH, N.; MURTHY, Y. R.; SINGH, V. **Dry high-intensity magnetic separation in mineral industry**: a review of present status and future prospects. Philadelphia, USA: Taylor & Francis, 2017a.

TRIPATHY, S. K.; BANERJEE, P. K; SURESH, N.; MURTHY, Y. R.; SINGH, V. **Innovation in magnetic techniques of material treatment**: technology at a crossroad. Philadelphia, USA: Taylor & Francis, 2017b.

WASMUTH, H. D.; UNKELBACH, K. H. Recent developments in magnetic separation of feebly magnetic minerals. **Minerals Engineering**, Great Britain, v. 4, 1991.

WILLS, B. A.; MUNN, T. J. N. **Wills' mineral processing technology**: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral. 7th ed. Amsterdam; Boston, MA: Elsevier, 2006.

YANG, D. C. Reagents in iron ore processing. *In*: SOMASUNDARAN, P.; MOUDIGIL, B. M. (ed). **Reagents in Mineral Technology**, New York: Marcel Dekker, 1988. Chap. 19. (Surfactant Science Series, v. 27).

ZONG, Q. X.; FU, L. Z.; BO, L. Variables and applications on dry magnetic separator. **E3S Web Conf.**, v. 53, 2018. Submitted Word in 3rd International Conference on Advances in Energy and Environment Research, 2018. (Xuzhou, China).