

SEPARAÇÃO MAGNÉTICA E ELETROSTÁTICA

João Alves Sampaio (*in memoriam*)

Eng. de Minas pela UFPE, Mestre e Doutor em
Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE-UFRJ
Tecnologista Sênior do CETEM/MCTIC

Adão Benvindo da Luz

Eng. de Minas pela UFPE, Mestre e Doutor em
Engenharia Mineral pela EPUSP
Pesquisador Titular do CETEM/MCTIC

Silvia Cristina Alves França

Eng. Química pela UFS, Mestre e Doutora em
Engenharia Química pela COPPE-UFRJ
Tecnologista Sênior do CETEM/MCTIC

Ligia Mara Gonzaga

Eng. de Minas pela UFCG, Mestre em
Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE-UFRJ
Professora do IFRN (Campus Parelhas)

SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

Introdução

Materiais magnéticos, que atuam como magnetos e são capazes de atrair minerais de ferro, são conhecidos desde os primórdios da civilização. No entanto, a prática da separação magnética só foi reconhecida no século XIX (SVOBODA e FUJITA, 2003).

Hoje, a separação magnética é um método consagrado na área de processamento de minérios para concentração e/ou purificação de muitas substâncias minerais, sendo amplamente utilizada na concentração de minerais ferrosos. A separação magnética pode ser empregada na concentração de minerais, dependendo das diferentes respostas ao campo magnético associadas às espécies mineralógicas individualmente, no beneficiamento de minério e na remoção de sucata.

A propriedade de um mineral que determina sua resposta a um campo magnético é chamada de susceptibilidade magnética. Com base nessa propriedade, os materiais ou minerais são classificados em duas categorias: aqueles que são atraídos pelo campo magnético e os que são repelidos por ele. No primeiro caso, incluem-se os minerais magnéticos. Dentre estes, tem-se os minerais ferromagnéticos, que são atraídos fortemente pelo campo, e os paramagnéticos, que são atraídos fracamente. No segundo caso, incluem-se aqueles que são repelidos pelo campo, e são denominados diamagnéticos ou não magnéticos.

Minerais ferromagnéticos compreendem aqueles que são fortemente atraídos pelo ímã comum. O exemplo mais conhecido é a magnetita. Os paramagnéticos são fracamente atraídos e o exemplo clássico é a hematita. Os minerais diamagnéticos possuem susceptibilidade magnética negativa e, portanto, são repelidos quando submetidos a um campo magnético. Entre outros, se destacam: quartzo, cerussita, magnesita, calcita, barita, fluorita, esfalerita, etc.

A separação magnética é uma técnica ambientalmente amigável e pode ser usada tanto a seco como a úmido, viabilizando o seu uso em regiões áridas ou onde há disponibilidade de água. O método a seco é usado, em geral, para minérios de granulometria grossa e o método a úmido para aqueles de granulometrias mais finas. Na história da separação magnética verificam-se avanços em ambos os métodos, sem contar a utilização da tecnologia dos supercondutores, que abriu um novo horizonte na área de processamento de minérios (LAWVER e HOPSTOCK, 1974; MIHALK, 1979; NORRGRAN, 1990; SVOBODA e FUJITA, 2003). São conhecidos separadores magnéticos que operam industrialmente com campo que varia de 5 a 6 T, sendo 1 Tesla (T) = 10^4 Gauss, que corresponde a 1 N/A.m (ARVIDSON e NORRGRAN, 2014; BEHARELL, 2015).

O campo de aplicação da separação magnética é muito amplo. É usada na concentração de vários minerais ferrosos e não ferrosos, na remoção de impurezas magnéticas contidas nos minerais industriais, na purificação de águas residuais, na remoção e reciclagem de metais contidos em resíduos industriais, etc. (SVOBODA e FUJITA, 2003).

O desenvolvimento da separação magnética evoluiu para uma tecnologia que permite separar, desde materiais fortemente magnéticos a fracamente magnéticos, mesmo que sob a forma de partículas finamente dispersas. Isso resultou no desenvolvimento da separação magnética de alta intensidade (*high intensity magnetic separation* – HIMS) e da separação magnética de alto gradiente (*high gradient magnetic separation* – HGMS), que usa eletromagnetos resistentes (baixa condutividade), supercondutores ou magnetos permanentes. A utilização e aprimoramento dos ímãs, em particular os de terras-raras, resultando na melhoria de suas propriedades magnéticas, contribuiu para inovar na área da tecnologia de separação magnética. Outro desenvolvimento que contribuiu também para inovação tecnológica foi a introdução de matrizes (placas com ranhuras ou metal expandido, malhas, bolas, etc), no campo magnético dos separadores. Essas matrizes, quando magnetizadas, geram um gradiente magnético local, resultando em maior força magnética que atua sobre a partícula (SVOBODA e FUJITA, 2003; METSO, 2015).

Desenvolvimentos mais recentes (STEINBERG et al., 2014) mostraram a viabilidade de uso de novo material, com propriedades mecânicas e magnéticas adequadas para uso como canga (*yoke material*) entre as bobinas de separadores magnéticos a úmido de elevado campo (*WHIMS-Wet High Intensity Magnetic Separator*), visando a redução do consumo de energia na separação de minerais. Testes realizados em usina piloto demonstraram que é possível reduzir a potência instalada em 46%.

Fundamentos Teóricos

Descrição das Grandezas Magnéticas Utilizadas na Separação Magnética

Quando se descreve um campo magnético, é comum referir-se a duas grandezas: densidade de fluxo magnético (\vec{B}) e intensidade de campo (\vec{H}), ambas medidas em Tesla (T). A primeira, \vec{B} , refere-se ao número de linhas de indução que passam através da partícula do mineral. A segunda, \vec{H} , é a força de magnetização que proporciona a passagem das linhas de indução através da partícula. Tais grandezas são vetores de campo, sendo caracterizadas não somente pela sua magnitude, como também pela sua direção no espaço, e estão relacionadas conforme a Equação [1]:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad [1]$$

μ = permeabilidade magnética do meio.

No vácuo, μ pode ser igual a μ_0 para fins práticos. Nas situações em que \vec{B} e \vec{H} diferem somente pelo fator de proporcionalidade μ , indistintamente podem ser chamadas de campo magnético.

A experiência mostra que, quando se coloca uma partícula mineral fracamente magnética em determinado campo \vec{H} de uma dada região do espaço, o fluxo magnético \vec{B} é acrescido do valor $\vec{\Psi}$ tal que:

$$\vec{B} = \vec{H} + \vec{\Psi} \quad [2]$$

$\vec{\Psi}$ = indução magnética do material.

O seu valor no ar é muito pequeno e, dessa forma, pode-se tomar o valor de \vec{B} igual a \vec{H} . É muito comum referir-se apenas à magnetização \vec{J} de um material, que é a ação de criar linhas de indução magnética ou um campo magnético em uma substância ou em uma região determinada do espaço. A relação entre a indução magnética e a magnetização é expressa por:

$$\vec{\Psi} = 4\pi \vec{J} \quad [3]$$

Conclui-se que a Equação [2] pode ser escrita da forma:

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi \vec{J} \quad [4]$$

A razão adimensional entre \vec{J} , magnetização, e \vec{H} , intensidade de campo, é chamada de susceptibilidade magnética k , ou seja:

$$k = \vec{J} / \vec{H} \quad [5]$$

Para materiais paramagnéticos, k é uma constante positiva e de baixo valor, não ultrapassando normalmente ao valor de 10^{-3} . Para os materiais diamagnéticos, k é uma constante negativa, usualmente menor (em módulo) que 10^{-5} . A susceptibilidade magnética de um material ferromagnético é variável e depende do campo de magnetização, da natureza e do manuseio da amostra.

Os materiais ferromagnéticos são, na sua maioria, referenciados em termos da permeabilidade magnética μ e, de acordo com a Equação [1], tem-se:

$$\mu = \vec{B} / \vec{H} \quad [6]$$

Das relações [4], [5] e [6] conclui-se que:

$$\mu = 1 + 4\pi k . \quad [7]$$

Partículas Minerais Submetidas à Ação de Campo Magnético

As grandezas magnéticas mais importantes que determinam a força magnética que atua em um sólido podem ser ilustradas revendo-se uma experiência de magnetismo e analisando-se o comportamento de algumas partículas minerais submetidas à ação do campo magnético.

Seja o campo magnético, H_z , produzido por um solenoide de laboratório, conforme Figura 1. No lado direito (B) da Figura 1, está representada a variação do campo ao longo do eixo do solenoide, quando esse é alimentado com uma potência de 400 kW.

A intensidade de campo é de 3 T no centro da espira e de 0,18 T nas extremidades. Se a corrente através do solenoide é reduzida 10 vezes, o campo magnético em todos os pontos será proporcionalmente reduzido em 10 vezes, e o consumo de energia será reduzido 100 vezes. Quando se colocam amostras de quartzo, hematita e magnetita em um determinado ponto, ao longo do eixo do solenoide, observa-se que, ao variar a corrente elétrica, o campo magnético também varia e, como consequência, o peso aparente da partícula também varia. Para facilitar, tomou-se a variação aparente do peso em grama (g) igual à unidade magnética em unidades de grama-força. Verifica-se que a força magnética é mais intensa nas extremidades da espira e não no centro, onde existe maior intensidade de campo magnético. Na verdade, no centro do solenoide a força é praticamente zero. Dessa forma, observa-se que a força é maior onde há maior gradiente de campo; no centro do solenoide são nulos o gradiente e a força magnética (LAWVER e HOPSTOCK, 1974).

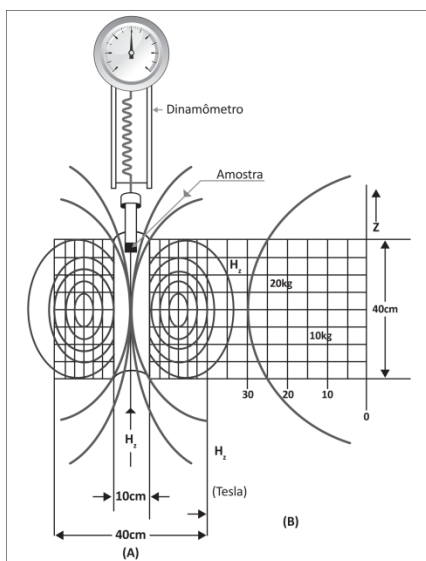


Figura 1. Campo magnético no interior de um solenoide e a representação gráfica do mesmo (LAWVER e HOPSTOCK, 1974).

Quando a amostra está na parte superior do solenoide, os pesos aparentes da hematita e magnetita aumentam, à medida que o campo aumenta. Entretanto, o peso aparente do quartzo diminui. Se a amostra estiver situada na parte inferior do solenoide, os pesos aparentes da hematita e magnetita diminuem e o do quartzo aumenta. Conclui-se que a força magnética que atua na hematita e na magnetita é dirigida para o centro do solenoide, onde existe um campo magnético mais elevado. No caso do quartzo, a força magnética é dirigida para a extremidade na qual o campo é mais fraco.

Lawver e Hopstock (1974) realizaram um estudo sobre as forças magnéticas exercidas sobre partículas minerais (quartzo, hematita e magnetita) com 1 g suspensas no eixo de um solenoide. Na Tabela 1 constam as diversas ações da força magnética equivalente ao peso de 1,0 g da amostra localizada na borda da espira. O sinal positivo indica a orientação no sentido de maior intensidade de campo. A unidade grama (g) foi utilizada para facilitar a comparação com o peso da amostra. Nota-se que a força sobre a hematita e o quartzo aumenta com o quadrado do campo ou do gradiente, embora a força sobre a magnetita aumente na mesma proporção do aumento de campo magnético.

Para o quartzo, mineral tipicamente diamagnético, a força atuante é muitas vezes menor que o seu peso. Na hematita, mineral paramagnético, a força é desprezível em comparação ao seu peso, sob ação de campo de 0,18 T. Apenas com o aumento do campo para a intensidade de 1,8 T, o valor da força magnética situa-se na ordem de grandeza da força gravitacional. A magnetita, mineral ferromagnético, tem força magnética muitas vezes maior do que o seu peso, mesmo sob ação de um campo com baixa intensidade.

Tabela 1. Medidas da força magnética sobre amostras de 1 g de quartzo, hematita e magnetita suspensas no eixo de um solenoide (LAWVER e HOPSTOCK, 1974).

	Ensaio 1	Ensaio 2
H_z	$1,8 \times 10^{-1}$ T	1,8 T
$\partial H_z / \partial z$	$1,7 \times 10^{-2}$ T.cm ⁻¹	$1,7 \times 10^{-2}$ T.cm ⁻¹
Quartzo	$-1,54 \times 10^{-4}$ N	$-1,54 \times 10^{-2}$ N
Hematita	$6,43 \times 10^{-4}$ N	$6,43 \times 10^{-1}$ N
Magnetita	15,8 N	158 N

O fenômeno que governa a separação magnética está relacionado a duas questões básicas: a primeira refere-se ao comportamento de diferentes partículas minerais quando são expostas a um mesmo campo magnético; a segunda refere-se às forças magnéticas que atuam sobre essas partículas (MIHALK, 1979).

Na situação inicial, tem-se a análise das respostas das diferentes partículas minerais ao campo a elas aplicado. Isso resulta na já conhecida atração ou repulsão das

mesmas pelo campo. Na Figura 2, registra-se a indução magnética para diferentes espécies mineralógicas, em função da intensidade de campo aplicado. Observa-se que os minerais ferromagnéticos, que apresentam magnetismo permanente (curva a), caracterizam-se pela resposta rápida da indução magnética com o campo. Na curva b, a indução magnética é menos acentuada, é o caso dos minerais paramagnéticos. No caso da curva c, a situação é inversa, ou seja, a indução magnética possui valor negativo. Isso é observado com os minerais diamagnéticos.

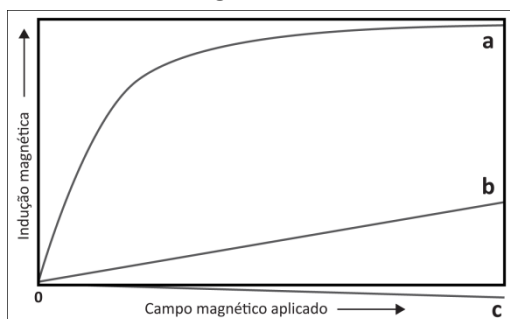


Figura 2. Indução magnética para diferentes espécies mineralógicas: (a) ferromagnéticas, (b) paramagnéticas e (c) diamagnéticas.

Vale salientar que as diferenças de susceptibilidade magnética dos minerais são exploradas na separação magnética, de maneira que as partículas com elevada susceptibilidade magnética respondem prontamente ao campo magnético. Como o campo magnético influencia na separação magnética dos diferentes minerais, o controle da intensidade de campo magnético permite uma separação seletiva das partículas minerais com diferentes valores de susceptibilidade magnética. Baixas intensidades de campo magnético são capazes de separar minerais com elevada susceptibilidade magnética, enquanto altas intensidades são necessárias para separar minerais com valores de susceptibilidade magnética baixos. O controle da intensidade do campo pode ser efetuado pelo emprego de eletroímãs, fazendo variar a corrente elétrica (STEINBERG et al., 2014).

Em segundo lugar, procura-se analisar como as forças magnéticas atuam sobre partículas submetidas a um campo. Para efeito didático, é útil imaginar que uma partícula magnetizada comporta-se, temporariamente, como uma barra magnética, em cujas extremidades estão os polos norte e sul. Nos materiais ferromagnéticos, o alinhamento dos dipolos é permanente. Nos materiais paramagnéticos, tal alinhamento não é permanente, sendo apenas induzido enquanto o campo é aplicado, tornando-se totalmente aleatório na ausência do campo.

Quando um campo magnético uniforme é aplicado a uma partícula, as forças que atuam sobre os dois polos da mesma são iguais e opostas, portanto, a resultante dessas forças é nula. Se o campo aplicado nas duas extremidades difere em intensidade, resultará numa força que age sobre a partícula. Tal fato mostra que o campo aplicado

possui variação espacial que é função das dimensões do material magnetizado. Essa variação de campo, também chamada de gradiente, resulta em uma força atuante sobre o material, provocando a atração ou repulsão do mesmo.

Nos equipamentos modernos, tanto o campo quanto o gradiente são os responsáveis de primeira ordem pelo processo de separação. Relembrando que a intensidade de campo refere-se ao número de linhas de fluxo que passa por uma determinada área, enquanto o gradiente de campo descreve a convergência ou divergência dessas linhas de fluxo. A Figura 3 ilustra muito bem esse fato: em **A** tem-se um campo uniforme e, em **B**, um campo convergente. Em **A**, a força resultante é nula sobre a partícula; em **B** tem-se um campo convergente, o fluxo de linhas mostra um gradiente de campo. Há, no caso, uma força resultante atuando sobre a partícula.

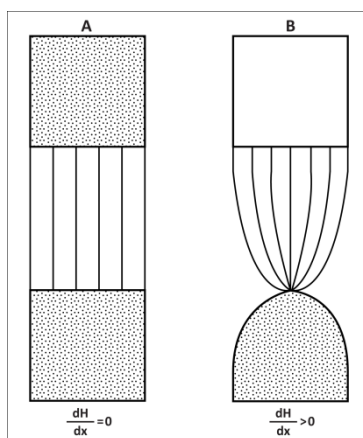


Figura 3. Campo magnético uniforme (A) e convergente (B), apresentando o gradiente de campo.

Descrição dos Equipamentos

Existe no mercado uma variedade de separadores magnéticos, os quais podem ser classificados, de acordo com o uso, em dois grupos: separadores a seco e a úmido. Esses podem ser subdivididos de acordo com as características do campo de indução. Logo, são encontrados os separadores de baixa e alta intensidades, tanto para a operação a seco, quanto a úmido. Essencialmente, qualquer separador magnético opera aplicando uma força sobre as partículas de maior susceptibilidade magnética, a fim de separá-las das partículas com menor susceptibilidade magnética (MATHIEU e SEROIS, 1988; INBRAS, 2010; GONZAGA, 2014).

A forma dos elementos que executam o trabalho de separação no equipamento exerce influência significativa sobre a classificação dos separadores. Assim, são denominados separadores de tambor, de rolos induzidos, de correias cruzadas, de carrossel, etc.

Vale destacar outros equipamentos desenvolvidos recentemente, que podem ser aplicados para minérios de ferro, que são: Slon (procedência chinesa comercializado pela Outotec no Brasil), o qual é um separador a úmido de alta intensidade e alto campo (mas de eixo horizontal), *Ferrous Whells* e os supercondutores magnéticos (GONZAGA, 2014). Além desses, existem os concentradores magnéticos de laboratório, como o Isodinâmico Frantz, Tubo Davis, o L4, o Boxmay Rapid, dentre outros. Os separadores Frantz e Tubo Davis são usados apenas em laboratório, visando a separação de espécies minerais magnéticas, quando da caracterização mineralógica. Na Figura 4 é apresentada uma classificação de diferentes separadores magnéticos, indicando suas principais aplicações, englobando os critérios de classificação já discutidos.

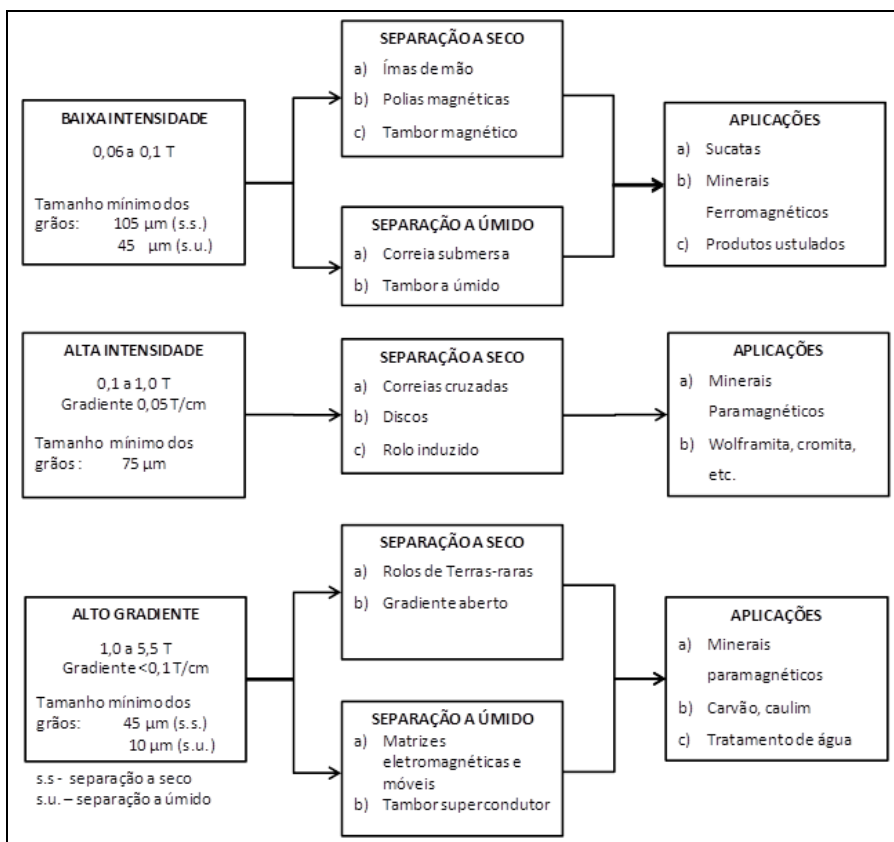


Figura 4. Diagrama contendo as características, classificação e aplicações dos separadores magnéticos.

No Quadro 1 são apresentadas as faixas de campo magnético nas quais os principais minerais podem ser separados.

Quadro 1. Relação dos principais minerais com propriedades magnéticas, indicando a faixa de campo magnético em que os mesmos podem ser separados por processo de separação magnética.

Grupo 1 - Ferromagnéticos - Faixa de Campo de 0,05 a 0,5 T		
Ferro		Magnetita
Grupo 2 - Magnéticos - Faixa de Campo de 0,5 a 1 T		
Ilmenita	Pirrotita	Franklenita
Grupo 3 - Fracamente Magnéticos - Faixa de Campo de 1 a 1,8 T		
Hematita	Mica	Calcopirita
Siderita	Molibdenita	Molibdenita
Rodonita	Cerargirita	Talco
Limonita	Huebnerita	Titanita
Braunita	Wolframita	Calcocita
Corindon	Bornita	Cinábrio
Pirolusita	Apatita	Gesso
Manganita	Tetrahedrita	Zincita
Calamina	Willemita	Ortoclásio
Esfarelita	Cerussita	Epidoto
Siderita	Dolomita	Fluorita
Rodocrosita	Psilomelana	Augita
Granada	Arsenopirita	Hornblenda
Serpentinita		
Grupo 4 - Muito Fracamente Magnéticos - Faixa de Campo acima de 1,8 T		
Pirita	Serpentinita	Cobalita
Smithsonita	Nicolita	Safira
Esfalerita	Diopsídio	Cassiterita
Estibinita	Turmalina	Ortoclásio
Criolita	Cuprita	Dolomita
Enargita	Galena	Spinélio
Berílio	Whiterita	Rubi
Magnesita	Crisocola	Covelita
Azurita	Rutilo	Feldspato
Gesso	Mica	Zircão
Malaquita		
Grupo 5 - Não Magnéticos e Diamagnéticos		
Barita	Corindon	Apatita
Bismuto	Topázio	Aragonita
Calcita	Galena	Grafita
Fluorita	Antimônio	

Fonte: Eriez Magnetics

Matrizes Ferromagnéticas

Há duas formas de se produzir um gradiente. A primeira, e mais simples, consiste na construção de um polo de eletroímã com a área bem menor que a do polo oposto, (Figura 3B). A segunda consiste na utilização de matrizes entre os polos do eletroímã. A finalidade dessas matrizes é aumentar o gradiente, produzindo sítios dentro das mesmas com campo de alta intensidade. Vários modelos foram propostos e/ou utilizados, dentre os quais se destacam: esferas, hastes, placas sulcadas, grades, lã de aço, etc. A matriz deve ser escolhida de modo a se ajustar às características do minério, de forma a contribuir para o melhor desempenho da separação. No processo de seleção da matriz devem ser feitas, entre outras, as seguintes considerações:

- gradiente máximo de campo;
- área superficial de captação por unidade de volume da zona da matriz;
- facilidade de limpeza da matriz (remoção das partículas magnéticas) com rapidez para manter o sistema de fluxo contínuo;
- porosidade da matriz para permitir a vazão da polpa; matrizes pouco porosas requerem maior pressão de bombeamento para obter a vazão ideal sem obstrução;
- o material usado na fabricação das matrizes deve reter o mínimo de magnetização quando as mesmas são removidas do campo (no caso da matriz reter quantidade significativa de magnetização, torna-se impossível a remoção das partículas magnetizadas).

Separador Magnético a Úmido de Alta Intensidade

O desenvolvimento da separação magnética tomou grandes dimensões com o advento das matrizes ferromagnéticas e, como consequência, a fabricação do separador Jones. Por conseguinte, o sistema de matrizes e a grande eficiência de separação nas faixas granulométricas finas ($-75 \mu\text{m}$) proporcionaram vantagens significativas desse separador quando comparado aos demais. A sua aplicação restringe-se, em geral, aos minerais paramagnéticos, devido à operação com campo magnético de alta intensidade, acima de 20.000 G (MIHALK, 1979; JAIN, 1987; WILLS e FINCH, 2016).

Quando se trata de minerais ferromagnéticos, o método encontra sérias limitações. A remoção das partículas magnéticas captadas pela matriz tornou-se um obstáculo, em virtude da alta susceptibilidade magnética dessas partículas, mesmo utilizando pressões de 40 a 50 psi na água de lavagem.

A Figura 5(A) ilustra, de forma esquemática, a operação de um separador magnético tipo Jones (escala de laboratório); esse é, certamente, o equipamento mais conhecido na separação magnética a úmido de alta intensidade. O princípio da separação adotado é largamente utilizado na concepção da maioria dos separadores magnéticos a úmido utilizados industrialmente (WILLS e FINCH, 2016).

No separador magnético tipo Jones, um elevado campo magnético é aplicado nas matrizes situadas na caixa 12 (Figura 5A). As matrizes são sulcadas, a fim de que as forças magnéticas sejam máximas no interior das mesmas. A alimentação é mantida constante por meio da válvula, durante um intervalo de 2 segundos; as partículas não magnéticas atravessam a região submetida ao campo e são descarregadas em um recipiente coletor.

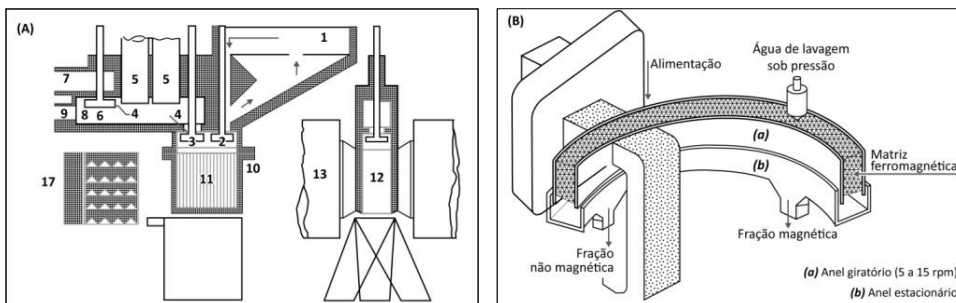


Figura 5. Diagrama representativo dos separadores a úmido de alta intensidade para laboratório (A) e de carrossel (B) para circuito contínuo.

Na segunda fase da operação, as partículas captadas na matriz são lavadas por um fluxo de água com baixa pressão, segundo o percurso (9 e 3). Durante a operação, os dois pistões hidráulicos (2 e 3) são acionados, um após o outro. O procedimento permite regular a pressão da água de lavagem, que é uma variável a ser controlada e que está relacionada a outros fatores, como a susceptibilidade magnética dos minerais. O tempo de lavagem na operação é estimado em 1,5 s para coleta das partículas paramagnéticas.

Na terceira e última fase da operação, o campo magnético é desligado, iniciando-se a lavagem do concentrado com o fluxo de água por meio do acionamento dos pistões (6 e 3). A faixa de pressão utilizada é de 40 a 50 psi, permitindo a coleta do concentrado magnético.

Separador Magnético Tipo Carrossel

Na Figura 5(B) são ilustradas as características essenciais do separador magnético a úmido de alta intensidade para circuito contínuo. O equipamento consta de um anel rotativo, às vezes chamado de carrossel, que atravessa um campo magnético no qual são instaladas as matrizes ferromagnéticas. A alimentação é feita de modo que a polpa atravesse uma região com campo de alta intensidade. A fração magnética é captada pela matriz ou, pelo menos, é retardada o suficiente para ser carregada pelo movimento do anel rotativo até uma região de campo com baixa intensidade. Nesta região, as partículas magnéticas remanescentes na matriz são descarregadas com auxílio de um jato d'água e, assim, torna-se possível a coleta da fração magnética em um determinado ponto da calha coletora. Com a remoção da fração magnética encerra-se um ciclo de separação.

A separação é obtida com seletividade, visto que facilmente se controlam as variáveis operacionais como: intensidade de campo, elemento de conversão de fluxo, taxa de alimentação, percentagem de sólidos na polpa, velocidade do anel rotativo ou rotor e descarga das partículas magnéticas.

Devido à operação com minérios de granulometria cada vez mais fina, as matrizes ferromagnéticas são fabricadas com abertura (*gap*) também reduzida, para permitir a separação. Atualmente o limite mínimo é de 1,5 mm (RIBEIRO e RIBEIRO, 2015).

Separador Magnético WDRE

É um concentrador magnético de tambor, via úmida, de média intensidade de ímãs permanentes (*Wet Drum Rare Earth magnets* - WDRE), podendo ser fornecido com três tipos de tanques: co-corrente, contracorrente e contra rotação. O tanque tipo contra rotação é recomendado essencialmente para a aplicação onde se requer altas recuperações e não há necessidade de um concentrado de alta pureza. O tanque do tipo contracorrente é aplicado como último estágio de concentração, onde se requer um concentrado bastante puro, porém, se aceita uma capacidade de alimentação relativamente baixa, o que pode inviabilizar a usina em alguns casos. Já o tanque co-corrente é muito eficiente para produzir um concentrado magnético a partir de materiais relativamente mais grossos, na faixa de sinterfeed, com alta capacidade, sendo normalmente o tipo recomendado para operações de concentração de minério de ferro, segundo o fabricante (INBRAS, 2010; GONZAGA, 2014).

A Figura 6 apresenta um separador magnético a úmido de tambor rotativo INBRAS-Eriez (WDRE 24"x6"), com campo magnético fixo, com tanque do tipo concorrente, instalado no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). O circuito magnético do equipamento é constituído por um conjunto formado pelos polos de ímãs, placas de aço e interpolos, que são montados sobre o eixo, no interior do tambor magnético; estende-se por uma região que abrange um arco de aproximadamente 120°, o qual pode ser instalado manualmente, sendo regulado para que seja possível posicioná-lo de modo a proporcionar a máxima eficiência na concentração (INBRAS, 2010).

Neste tanque co-corrente, a polpa é bombeada para uma caixa de alimentação, posicionada em uma das laterais do separador, e flui no mesmo sentido de rotação do tambor. Ao se iniciar a operação, os minerais ferrosos são imediatamente atraídos pela força de atração magnética gerada pelo tambor magnético, ficando presos à face do mesmo, que se encontra em rotação, sendo transportados até uma região onde cessa a ação do campo magnético. Nesse ponto, o material magnético é descarregado sobre a calha de descarga do concentrador, posicionada na outra lateral do tambor, com o auxílio de jato de água do sistema de spray e pelo raspador, sendo transportado por gravidade até o ponto de coleta do concentrado, como mostra a Figura 6 (GONZAGA, 2014).

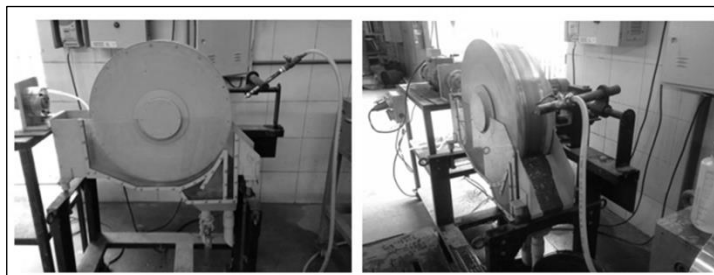


Figura 6. Separador magnético de tambor WDRE.

De acordo com o fabricante (INBRAS, 2010), as principais variáveis operacionais desse equipamento são:

- percentagem de sólidos na alimentação: quanto maior a porcentagem de sólidos, maior arraste e perda de massa magnética para o rejeito;
- distância entre o tambor e o fundo da bacia: essa distância pode ser aumentada ou diminuída conforme a necessidade do processo. Quanto mais próximo o tanque se encontrar da face inferior do tambor, menor espaçamento (*gap*) entre eles e mais intenso o campo magnético aplicado sobre a polpa de minério, sendo, portanto, obtida uma maior atração dos minerais ferrosos na direção do tambor;
- frequência de rotação do tambor (RPM) maior frequência de rotação do tambor resulta em menor recuperação mássica (rendimento), maior teor do concentrado e menor arraste de massa magnética para o rejeito;
- taxa horária da alimentação: é muito importante introduzir uma alimentação de polpa constante ao longo de toda a largura do tambor, sem sobrecarga, com variação máxima de capacidade de até 10%. Polpas muito diluídas implicarão em uma redução na capacidade do separador. Por outro lado, se forem utilizadas altas percentagens de sólidos, acima de 45%, possivelmente ocorrerá arraste de minerais não magnéticos para o concentrado, tendo como consequência a queda no teor do produto.

Separador *Ferrous Wheel*

O separador *Ferrous Wheel* é um equipamento de concentração magnética de alto gradiente, utilizado industrialmente para minério de ferro de baixo teor, e que se caracteriza por apresentar custo mais baixo quando comparado a outros concentradores de alta intensidade (Figura 7).

Sua principal vantagem é o baixo custo operacional por não demandar energia elétrica na geração de campo magnético. O equipamento é de fácil operação e, dependendo do circuito, pode ser utilizado como *rougher* ou *rougher/cleaner*, no

mesmo equipamento. Os polos magnéticos são construídos com ímãs permanentes de terras raras, operando com matrizes de separação, o que propicia a geração de campos magnéticos de alto gradiente, de 2.200 G, os quais são ampliados pelo uso de matrizes, criando campos magnéticos de até 12.000 G (ERIEZ, 2001).

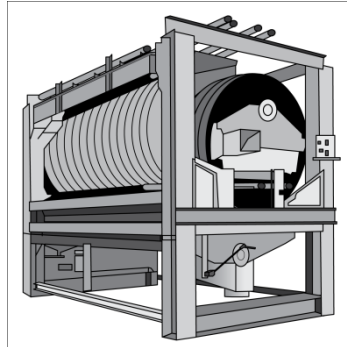


Figura 7. Separador *Ferrous Wheel* (ERIEZ, 2001).

Separador de Correias Cruzadas

O separador de correias cruzadas ilustrado na Figura 8, consiste, essencialmente, de um transportador de correia plana (correia principal), que passa entre os polos paralelos de dois eletroímãs, e outro transportador de correia plana perpendicular à principal (correia secundária). A correia secundária passa sobre a superfície do polo superior, com a área menor em relação a do polo inferior (em forma de bixel), proporcionando a convergência do campo. Entre as duas superfícies existe um vão ou *gap*, separando as duas correias por uma distância da ordem de 10 mm, na região de maior intensidade de campo, por onde passa o material. O equipamento, que opera a seco com intensidade de campo até 1,0 T, possui um índice elevado de seletividade e sua faixa granulométrica de aplicação está compreendida entre 1,65 mm e 104 μm (JAIN, 1987).

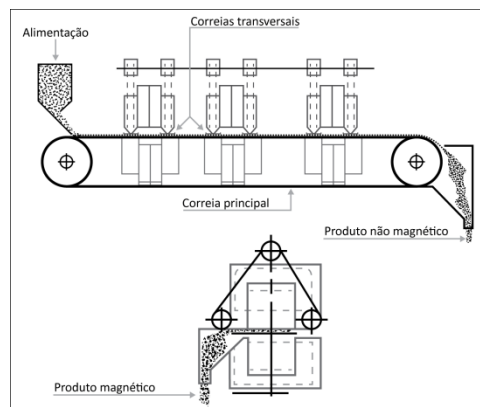


Figura 8. Diagrama esquemático de um separador magnético de correias cruzadas.

Os minerais a serem separados são introduzidos sob a forma de uma camada fina sobre a correia principal. Os minerais magnéticos são atraídos e retidos na correia secundária, que se desloca transversalmente à principal, transportando-os para uma região ausente de campo para deposição nas caixas coletoras. O material não magnético permanece na correia principal, sendo depositado na caixa coletora situada na extremidade da correia, conforme ilustrado na Figura 8.

É comum, nos modelos industriais, a existência de dois ou mais pares de polos em série, entre os quais passa a correia principal, de uma extremidade a outra do separador. Tais equipamentos permitem a operação com diferentes intensidades de campo ao longo da correia principal. O valor de intensidade cresce desde a alimentação até o final da correia. Como consequência, permite-se a separação seletiva de materiais, com diferentes susceptibilidades magnéticas, em um mesmo separador. Os principais parâmetros operacionais do separador são:

- velocidade das correias, tamanho do *gap* entre os polos e a taxa de alimentação;
- fluxo magnético, que aumenta no sentido da alimentação à extremidade oposta do separador.

Separador de Rolo Induzido

Neste separador, a fração magnética é separada durante a passagem do minério através de campos magnéticos com intensidades de até 1,8 T, produzidos por rotores localizados entre os polos de eletroímãs. O *gap* entre o polo e o rotor pode ser ajustado para qualquer posição, sendo usual trabalhar com abertura bem menor, comparada com a de outros separadores. Como o fluxo magnético é uma função inversa do quadrado do tamanho do *gap*, as forças de campo mais intensas são obtidas com o *gap* menor, e, conseqüentemente, uma alimentação com granulometria mais fina. A convergência de campo é reforçada, em alguns modelos, pela utilização de rotores dotados de sulco na superfície.

As partículas são alimentadas sobre o rotor e penetram imediatamente na região de campo entre o polo e o rotor. As partículas não magnéticas permanecem inalteradas. Tal fato confere às partículas magnéticas e não magnéticas trajetórias diferentes, sendo coletadas separadamente, conforme se observa na Figura 9.

Os separadores de rolo induzido são usados na remoção das impurezas ferruginosas contidas nos concentrados de quartzo (areia), feldspato, barita, entre outras. Como etapas de concentração, são largamente utilizados nos circuitos de beneficiamento de monazita, cromita, granada, wolframita, cassiterita, rocha fosfática, dentre outros (WILLS e NAPEIR-MUNN, 2006).

Os equipamentos são fabricados desde o modelo mais simples, com um rolo, até os modelos mais sofisticados, com rolos em série. A capacidade de alimentação varia em função do processo. No entanto, a faixa de operação usual situa-se entre 17.700 a 35.400 kg/h.m de largura do rolo.

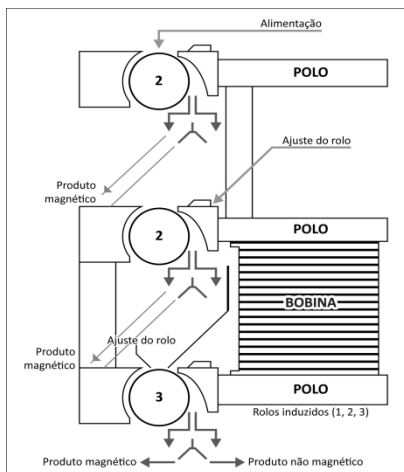


Figura 9. Diagrama esquemático de um separador magnético de rolo induzido.

Separador Isodinâmico Frantz

Uma ampla variedade de separadores magnéticos pode ser utilizada no fracionamento de amostras em estudos de caracterização mineralógica. O mais comumente utilizado em laboratório é o aparelho Frantz Isodinâmico modelo L-1, pioneiro na linha de equipamentos de laboratório, devido à sua versatilidade e à existência de diversos artigos publicados sobre sua aplicação (Figura 10).

O Frantz Isodinâmico realiza operações a seco e consiste basicamente de uma calha vibratória, com inclinações longitudinal e lateral variáveis (0 a 90°), situada entre os polos de um eletroímã gerador de campo magnético. A calha é o local onde efetivamente ocorre a separação entre minerais fortemente magnéticos e fracamente magnéticos. Sua inclinação, tanto lateral quanto longitudinal, e vibração são importantes para determinar o tempo de exposição dos minerais ao campo magnético, influenciando diretamente na eficiência da separação, principalmente em função da massa específica e tamanho das partículas (MATHIEU e SEROIS, 1988; GONZAGA, 2014).

O equipamento pode processar, com eficiência, partículas com tamanhos entre 833 e 74 μm . Para partículas maiores que 833 μm , há um limite físico para o seu escoamento (para chegar a esse valor, a abertura de alimentação do funil deve ser aumentada). No caso do limite inferior, a eficiência pode ser boa quando usado para partículas menores, mais isso dependerá das características do minério. Uma classificação por tamanho de boa qualidade é um pré-requisito básico para o bom funcionamento do separador Frantz, sendo ainda mais importante no caso da separação

de partículas mais finas. O material também deve estar bem seco de modo que permita um bom escoamento. Uma regulagem otimizada da vibração da calha e da quantidade de material alimentado pelo funil farão grande diferença na eficiência de separação (SAMPAIO et al., 2001).

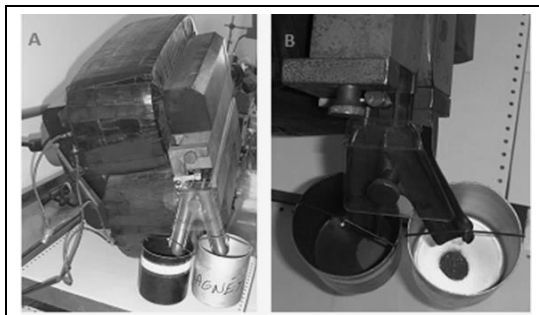


Figura 10. Separador isodinâmico Frantz: vista do equipamento (A) e descarga dos produtos magnético e não magnético (B).

Tubo Davis

É um concentrador eletromagnético em escala de bancada utilizado para estimar o teor e a recuperação mássica (rendimento) no processo de separação de baixa intensidade de campo magnético. O Tubo Davis (Figura 11) é constituído por um eletroímã que pode gerar um campo magnético de até 4.000 G.

O equipamento possui um tubo de separação de vidro e um mecanismo de agitação motorizado. O tubo é colocado entre os polos do ímã a um ângulo de aproximadamente 45°, o qual pode ser variado. Durante a operação, um pequeno motor elétrico aciona o mecanismo de agitação que suporta o tubo de vidro, de maneira que o tubo move-se para frente e para trás enquanto gira. As partículas magnéticas presentes na amostra são direcionadas para a zona de maior intensidade do campo, enquanto que as partículas não magnéticas são direcionadas para fora do tubo. Um concentrado fica, então, disponível para que seja determinada a percentagem de material magnético na amostra ensaiada (MATIEU e SEROIS, 1988; GONZAGA, 2014).



Figura 11. Tubo Davis.

Separador L4

É um concentrador eletromagnético de bancada que possui uma matriz de separação fixa entre dois polos magnéticos induzidos, conforme ilustra a Figura 12. É utilizado com boa eficiência na estimativa de qualidade e recuperação metalúrgica para as etapas de separação com campos magnéticos de baixa, média e alta intensidade. Utilizando uma matriz de separação com abertura de 1,5 mm, permite atingir intensidade de campos magnéticos de até 13.000 G (MATHIEU e SEROIS, 1988; GONZAGA, 2014).



Figura 12. Separador L4.

Separador Magnético de Alto Gradiente RAPID

O separador magnético de alta intensidade Boxmag Rapid (Figura 13A) opera com o material na forma de polpa. O valor do campo magnético varia com a intensidade da corrente elétrica e com a grade utilizada no processo de separação, podendo atingir até 2,1 T (21.000 G). O separador magnético Rapid processa pequenas quantidades de material, em decorrência do tamanho de suas matrizes (Figura 13B). Contudo, é um equipamento prático e versátil que proporciona resultados qualitativos confiáveis, a baixo custo.

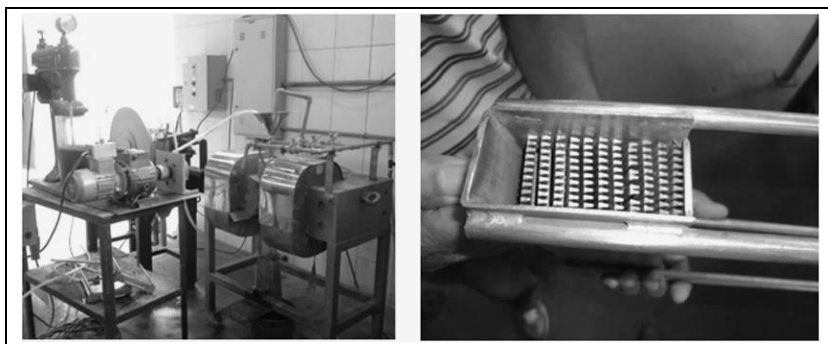


Figura 13. Separador Magnético Rapid: (A) vista geral do equipamento e (B) matriz de separação.

Variáveis que Afetam o Processo de Separação Magnética

A elaboração detalhada das variáveis operacionais para o processo de separação magnética não é trivial, uma vez que as mesmas estão ligadas ao tipo de separador ou ao próprio método de separação. De um modo geral, não existe um conjunto genérico de variáveis que permita o controle operacional da separação magnética. Por exemplo, as variáveis empregadas no controle da separação magnética a úmido de alta intensidade não são as mesmas que controlam a separação magnética a seco de alta intensidade. Por essas e outras razões, estas informações limitam-se a comentar algumas variáveis que afetam a otimização do processo de separação.

Intensidade de Campo Magnético

A natureza do campo magnético tem marcada influência na separação dos diferentes tipos de minerais. A história da separação magnética revela que sua aplicação, em escala contínua, só foi possível quando se produziu um campo magnético convergente para o qual fluem as partículas com maior susceptibilidade magnética. Por outro lado, o controle da intensidade de campo permite a separação seletiva das partículas com diferentes valores na susceptibilidade magnética. Com baixa intensidade de campo, separam-se minerais com elevadas susceptibilidades e, com alta intensidade, separam-se aqueles com valores mais baixos de susceptibilidade. Em geral, o controle da intensidade de campo é feito com o emprego de eletroímãs, variando a corrente elétrica. Para alguns separadores, pode-se variar o campo mediante ajuste prévio da distância entre os polos. Os equipamentos com ímãs permanentes não dispõem de mecanismos que flexibilizem a variação da intensidade de campo, comparados àqueles equipados com eletroímãs.

Alimentação

O controle da velocidade de passagem das partículas minerais através do campo magnético constitui uma das formas de se melhorar a seletividade da separação. No caso da separação a seco, é conveniente que o leito das partículas que atravessa o campo não seja espesso, pois em tais condições somente as partículas situadas na superfície do leito serão atraídas pelo campo. De outro modo, partículas magnéticas situadas na camada inferior do leito arrastarão aquelas não magnéticas, situadas na camada superior, contaminando o concentrado. A alimentação ideal para os separadores de correias cruzadas seria aquela cujo leito fosse constituído por uma única camada de partículas, o que nem sempre se verifica na prática. Tal procedimento diminui substancialmente a produção, contudo aumenta a seletividade.

O excesso de alimentação acarreta a formação de retenção de minerais não magnéticos dentro dos flocos magnéticos, prejudicando a separação a seco, principalmente, quando se trabalha com material fino e de elevada susceptibilidade. Tal contaminação deve-se não somente à formação de flocos, mas também à formação

de cadeias instantâneas de partículas magnetizadas que arrastam as não magnéticas. Nos separadores a úmido, não há grande velocidade das partículas na direção da maior intensidade de campo devido à resistência oferecida pela água. Além de controle da alimentação, em alguns casos, é usado o recurso da reversão na polaridade para minimizar o efeito de adesão.

Aplicações do Processo de Separação Magnética

Na área de concentração de minérios de ferro, a principal aplicação prática da separação magnética a úmido de alta intensidade é feita pela VALE, em Minas Gerais, nos municípios de Itabira e Ouro Preto (Mina Fábrica, próxima a Congonhas do Campo) onde são usados separadores de carrossel, tipo Jones-Humbolt, na concentração de hematita. No Brasil, a utilização inicial desse tipo de separador, no início de 1970, permitiu à então Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), viabilizar o aproveitamento de itabiritos, até então não considerados como minério de ferro (LUZ e ALMEIDA, 1989).

Outra aplicação da separação magnética a úmido de alta intensidade é no beneficiamento de caulim, com finalidade de remover minerais de ferro e titânio, prejudiciais à alvura do produto. Isto ocorre na Caulim da Amazônia S.A. – CADAM, localizada em Munguba, distrito de Almerim-PA, onde são utilizados separadores magnéticos criogênicos, tipo Carpcoc, gerando campo magnético da ordem de 5,0 T (SAMPAIO et al., 2001; ARVIDSON e NORRGRAN, 2014).

Outras utilizações do processo de separação magnética incluem:

- remoção de impurezas magnéticas de concentrados de cassiterita, scheelita, cromita, areia quartzosa e de feldspato;
- remoção da magnetita do amianto e dos minérios fosfatados;
- purificação de talco, na recuperação de wolframita e minerais sulfetados de molibdênio, contidos em rejeitos de beneficiamento;
- beneficiamento de minérios de urânio e de minerais pesados (ilmenita, rutilo) contidos em areias de praia.

A remoção, por separação magnética, de pirita contida em carvão é uma área de aplicação potencial desse processo. Outra aplicação, também em potencial, que pode utilizar técnicas de separação magnética de alta intensidade é a purificação de água e efluentes. Por meio do uso de separadores com supercondutores é possível remover as impurezas magnéticas, em alguns casos cancerígenas, como também certos vírus e/ou bactérias que podem associar-se ao material magnético (OKA et al., 2010; ZHANG et al., 2011). Com os avanços tecnológicos obtidos no projeto e operação dos supercondutores, tais aplicações tornam-se cada vez mais plausíveis (BEHARRELL, 2015).

No Quadro 2 são apresentadas as principais aplicações industriais da separação magnética.

Quadro 2. Aplicações industriais da separação magnética.

Tipo de minério/material	Exemplos	Tipo de separador magnético (SM)
Minério de ferro (paramagnético)	Hematita	SM alta intensidade a úmido, SM alto gradiente, SM imãs permanentes de terras raras
Magnetita	Taconito	SM baixa intensidade (seco ou úmido)
Areia de praia	Minerais pesados	SM baixa intensidade, SM alta intensidade a úmido, SM rolos induzidos, SM imãs permanentes de terras raras
Argilominerais e talco	Caulinita e talco	SM alto gradiente
Materiais para carga	Carbonato de cálcio	SM imãs permanentes de terras raras (a seco)
Insumos para indústrias de vidro e cerâmica	Sílica, feldspato e nefelina sienito	SM baixa intensidade, SM alta intensidade a úmido, SM rolos induzidos, SM alto gradiente, SM imãs permanentes de terras raras (a seco)
Insumos para a indústria de refratários	Alumina, cromita e magnesita	SM baixa intensidade, SM rolos induzidos, SM imãs permanentes de terras raras (a seco)
Minerais metálicos não ferrosos	Minerais sulfetados, wolframita e cassiterita	SM alta intensidade a úmido, SM alto gradiente, SM imãs permanentes de terras raras (a seco)

Fonte: (ARVIDSON e NORRGRAN, 2014)

Nos últimos anos, os espinélios de ferro têm sido amplamente empregados como adsorventes para captura de íons metálicos presentes em água de abastecimento (REDDY e YUN, 2016; HUANG e KELLER, 2015), com ênfase na remoção de arsênio, chumbo, cádmio, mercúrio e cromo, conhecidos por causar graves danos à saúde humana. A utilização dos espinélios de ferro e seus compósitos na recuperação de diversos poluentes tóxicos - catiônicos e aniônicos - de soluções aquosas deve-se à sua moderada magnetização de saturação, além de elevada estabilidade física e química.

Avanços na Separação Magnética

No início dos anos 1980, a grande inovação na separação magnética se deu pela produção e uso de imãs permanentes com ligas contendo elementos de terras raras, como as ligas de samário-cobalto (Sm-Co) e de neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B); a utilização desses elementos promoveu um aumento expressivo nos níveis de fluxo magnético (WASHMUTH e UNKELBAC, 1991; ARVIDSON e NORRGRAN, 2014), possibilitando a obtenção de um ímã permanente capaz de induzir um campo com intensidade de 1,8 T.

A partir desse advento, pode-se observar uma evolução acelerada na densidade de carga dos ímãs produzidos (Figura 14) e o conseqüente crescimento da sua aplicação em diferentes equipamentos de separação magnética.

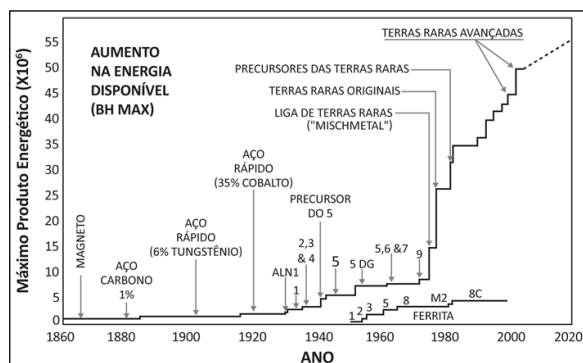


Figura 14. Desenvolvimento e avanços dos materiais magnéticos ao longo dos anos (adaptado de Arvidson e Norrgran, 2014).

O uso da tecnologia de supercondutores, combinada ao princípio da separação magnética em tambor, promoveu avanços significativos no processamento de materiais paramagnéticos. Dessa forma, a combinação resultou na obtenção de um campo magnético com intensidade elevada para promover a polarização do material, como também em um gradiente elevado de campo, que proporciona forças magnéticas de alta intensidade sobre o material submetido à separação. Tal tipo de separação adequado ao tratamento de minerais com baixas susceptibilidades magnéticas, mesmo em granulometrias finas, possui, entre outras, as seguintes vantagens (MURRAY, 1986; ARVIDSON e NORRGRAN, 2014):

- o emprego de campo magnético acima de 4,0 T, sem que haja a saturação magnética do ferro, que constitui o separador na zona de separação;
- elevada taxa de produção, tanto para material fino quanto grosso, devido à flexibilidade do sistema em operar com uma camada espessa do material sobre o tambor;
- não há aprisionamento do material grosso ou fortemente magnético dentro da área de maior densidade de fluxo magnético, portanto, não há necessidade da pré-concentração para remoção do material ferromagnético;
- pode-se operar um mesmo sistema tanto a seco quanto a úmido, modificando apenas a posição do tambor.

Embora os separadores com supercondutores apresentem razões que justificam sua utilização - podem gerar campos magnéticos com intensidade da ordem de 20 T, ainda são encontradas dificuldades na sua aplicação em alta escala (NORRGRAN, 1990). A economia real de energia não é tão elevada, pois as operações de resfriamento das bobinas possuem alto consumo de energia. O uso do hélio líquido, apesar de confiável, é

oneroso, pois a temperatura de resfriamento é de cerca de 4K (-269°C). Mesmo com tais dificuldades, o processo de separação é utilizado no beneficiamento de caulim, como etapa auxiliar de purificação, no tratamento do carvão, na purificação de produtos químicos, cerâmicos, entre outros.

Um dos desenvolvimentos tecnológicos mais expressivos na área dos separadores com supercondutores foi a eliminação do uso dos líquidos criogênicos no sistema de resfriamento (ARVIDSON e NORRGRAN, 2014; KAJIKAWA et al., 2016). Com grande simplicidade operacional, o campo magnético é gerado por um condutor de nióbio-tântalo (Ni-Ta). O líquido refrigerante é armazenado em um criostato, isolado termicamente a vácuo; o resfriamento ocorre por condução, por meio de um crioresfriador, com o líquido refrigerante podendo atingir temperaturas de 7 K (-266°C).

Outro desafio operacional enfrentado no beneficiamento de minérios tem sido a granulometria cada vez mais fina, seja por características naturais ou por exigências do processo de beneficiamento, ocasionando a produção de concentrados minerais com teores mais baixos do que os desejados, ou recuperações metalúrgicas aquém daquelas especificadas para a economicidade do processo (GONÇALVES e BRAGA, 2016). Porém, já é possível encontrar em operação separadores de rolos induzidos com imãs de terras-raras de alta eficiência (HE-RER Outotec®), que podem ser alimentados com material de granulometria menor do que 74 µm. A vantagem desses equipamentos é a possibilidade da alimentação ser feita num ponto da correia em cima do rolo magnetizado, reduzindo o tempo de residência das partículas sobre a mesma; com isso, minimiza-se a possibilidade de geração de efeitos triboelétricos ou de carregamento estático das partículas não magnéticas (DOBBINS et al., 2009), permitindo a produção de concentrado magnético mais puro.

O beneficiamento de minérios de granulometria cada vez mais fina ou de recuperação de rejeitos ultrafinos torna-se cada vez mais comum e traz desafios operacionais à separação magnética a úmido de alta intensidade. A necessidade de menor abertura da matriz ferromagnética para recuperação dessas partículas minerais por separação magnética de alta intensidade amplia o problema de entupimento/bloqueio das matrizes ferromagnéticas, tido como um grande gargalo da operação desse tipo de equipamento. A *Gaustec Magnetics* apresenta uma nova tecnologia, a NoBLOCK®, para evitar a passagem de partículas grossas para a alimentação do separador (RIBEIRO e RIBEIRO, 2015). Trata-se de uma peneira rotatória, cuja tela curva é semelhante a uma fatia fina da matriz ferromagnética; a curvatura promove um aumento gradual na abertura da tela, facilitando o fluxo de polpa para alimentação do separador; além disso, a peneira tem inclinação de 10°, que auxilia no deslocamento dessas partículas grossas retidas no seu interior, para fora do equipamento. Segundo os autores, essa peneira rotatória é mais eficiente do que as peneiras vibratórias convencionalmente utilizadas nesse tipo de operação, além de apresentar menor custo operacional.

SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA

Introdução

A separação eletrostática é um processo de concentração de minérios que se baseia nas diferenças entre algumas das propriedades dos minerais, tais como: condutibilidade elétrica, susceptibilidade em adquirir cargas elétricas superficiais, forma geométrica, densidade, entre outras. Para promover a separação, é necessária a existência de dois fatores:

- carga elétrica superficial das partículas ou polarização induzida que lhes permitam sofrer a influência do campo elétrico;
- um campo elétrico de intensidade suficiente para desviar uma partícula eletricamente carregada, quando em movimento na região do campo.

Descreve-se, portanto, a separação eletrostática em duas etapas: o carregamento elétrico das partículas e a separação.

O termo eletrostático é empregado com frequência, porque os primeiros separadores eram de natureza puramente eletrostática, sem o chamado fluxo iônico. Atualmente são usados equipamentos nos quais a energia elétrica é aplicada em forma de fluxo iônico e denominada de eletrodinâmica.

Os primeiros equipamentos a serem utilizados em escala industrial datam de 1800 e foram empregados na separação de ouro e sulfetos metálicos da ganga silicosa com baixa condutividade (INCULET, 1984). No período de 1920-1940, com o advento da flotação, houve pouca utilização do processo. Somente a partir de 1940, com o progresso obtido no uso de fontes de alta tensão e os aperfeiçoamentos nas áreas de eletricidade e eletrônica, a separação eletrostática tornou-se competitiva, quando comparada com outros processos na área do beneficiamento de minérios.

A separação eletrostática está condicionada, entre outros fatores, ao mecanismo do sistema que produz as cargas superficiais nos diversos minerais a serem separados e à granulometria de liberação, que deve proporcionar uma partícula com massa suficiente para que haja uma atração efetiva por parte do campo elétrico aplicado (ARVIDSON e BARNEA, 1982).

Neste trabalho, há uma descrição da eletrização das partículas dos minerais, dos tipos de separadores utilizados, dos condicionantes ambientais do processo, da granulometria da alimentação e de implicações industriais.

Eletrização de Partículas Minerais

O sucesso da separação eletrostática dos minerais está relacionado à eficiência do mecanismo de eletrização dos mesmos. As espécies mineralógicas devem responder, de forma diferente, tanto ao carregamento superficial de cargas como ao campo elétrico aplicado a elas e, ainda, à sua natureza, composição química, etc.

Para que ocorra a separação dos minerais, os mesmos devem estar individualizados, o que favorece a sua eletrização seletiva. Outro fator a ser considerado é o limite inferior da granulometria de liberação, que deve ser da ordem de 20 μm . Em tais condições deve haver uma quantidade mínima de massa, suficiente para que haja uma atração efetiva por parte da força elétrica aplicada.

Dentre os processos de eletrização, três deles destacam-se no âmbito dos métodos de concentração. Assim, são usadas eletrizações por contato ou atrito, por indução e por bombardeamento iônico. Cada processo proporciona certo aumento na carga superficial das partículas; no entanto, as operações práticas são levadas a efeito por dois ou mais mecanismos, conjuntamente.

Eletrização por Contato ou Atrito

Quando minerais com naturezas diferentes são postos em contato e separados posteriormente, pode ocorrer, dependendo das condições, o aparecimento de cargas elétricas com sinais opostos nas superfícies dos mesmos. O fenômeno é conhecido desde a antiguidade, quando Thales de Mileto (500 a. C.) observou que o âmbar atritado tinha o poder de atrair pequenas partículas de minerais (BLAZY, 1970).

Tal processo de eletrização está ligado à natureza e à forma das partículas associadas ao processo. Bons resultados são obtidos com operações repetidas, que são necessárias por causa da pequena área de contato entre as partículas. Por isso, cuidados especiais devem ser tomados com as superfícies das mesmas, que devem estar limpas e secas. Para materiais com baixa condutividade elétrica, pode-se atingir uma densidade elevada de carga superficial, o que favorece a separação.

Dois aspectos devem ser observados no processo de eletrização por contato. Em primeiro lugar, está a transferência de cargas através da interface nos pontos de contato entre os materiais que, sob condições rígidas de controle, permitem prever a polaridade da eletrização. Em segundo lugar, está a carga residual de cada material depois de interrompido o contato entre esses, fenômeno ainda sem explicação (DASTMANN e UNKELBERG, 1988). Na verdade, pouco se sabe sobre como controlar ou quantificar a carga elétrica que pode permanecer após cessar o contato entre os materiais.

As aplicações industriais com esse tipo de eletrização são baseadas em resultados experimentais, consistindo em elevado número de ensaios, os quais levam em consideração as influências devidas ao ambiente operacional: umidade, temperatura, campo elétrico, dentre outras.

Eletrização por Indução

Quando as partículas minerais, em contato com uma superfície condutora e aterrada, são submetidas a um campo elétrico, observa-se a indução de uma carga superficial nas mesmas. Tal carga depende da intensidade de campo e da natureza das

partículas, lembrando que não existem condutores e dielétricos perfeitos. Por meio da indução, tanto o material condutor quanto o dielétrico adquirem cargas elétricas; no entanto, os primeiros possuem uma superfície equipotencial quando em contato com a superfície aterrada. As partículas dielétricas submetidas à indução tornam-se polarizadas devido à transferência de cargas. As partículas condutoras deixam fluir suas cargas por meio da superfície aterrada. Ficam, então, com carga de mesmo sinal ao da superfície aterrada e são repelidas por ela. Já as não-condutoras sofrem apenas polarização, conforme mostrado na Figura 15. Essas ficam então aderidas à superfície como consequência da atração eletrostática.

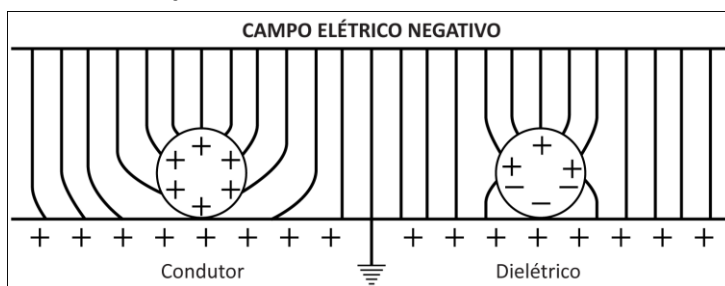


Figura 15. Diagrama representativo de duas partículas após o carregamento por indução.

As diferentes respostas dadas pelas partículas minerais ao processo de indução de cargas são utilizadas na separação das mesmas pelo método eletrostático.

Eletrização por Bombardeamento Iônico

Os gases, sob condições normais de temperatura e pressão (CNTP), não conduzem a corrente elétrica, comportando-se como dielétricos. Por outro lado, se submetidos a um potencial elevado, ocorre uma descarga iônica e, conseqüentemente, a condução da corrente elétrica.

A intensidade da descarga depende da forma dos eletrodos, que estabelecem o potencial. Na realidade, o que ocorre é um fluxo iônico entre os eletrodos de pequenas dimensões. Na prática, os melhores resultados são obtidos usando-se eletrodo fabricado com fio de tungstênio e diâmetro da ordem de 0,25 mm (LAWVER e HOPSTOK, 1985). Denomina-se efeito corona o fluxo iônico obtido com tais eletrodos, quando submetidos a potenciais elevados. O efeito corona é utilizado na eletrização de partículas de minerais durante a separação eletrostática, e constitui-se em um dos mecanismos mais eficientes de carregamento. Todas as partículas de formas e dimensões diferentes, condutoras e não-condutoras, adquirem cargas com a mesma polaridade do eletrodo. Tal mecanismo é usado no processamento de minérios, quase que exclusivamente para separar os materiais condutores dos dielétricos. Trata-se de um processo que requer equipamento de alta tensão e, na prática, os melhores resultados são obtidos quando o mecanismo está associado a outro, como, por exemplo, a eletrização por contato e com repetidas etapas de limpeza (INCULET, 1984).

O procedimento prático consiste em fazer passar, através da região do espaço em que está situado o fluxo iônico, as partículas a serem carregadas. Todas aquelas situadas sobre a superfície aterrada recebem um bombardeamento intenso: as condutoras transferem suas cargas à superfície, enquanto as dielétricas as retêm, permanecendo aderidas à mesma, devido ao efeito da força de imagem, provocado pela indução do aparecimento de carga de sinal oposto na superfície do rolo (WILLS e FINCH, 2016).

Tipos de Separadores

Os equipamentos utilizados na prática têm em comum alguns componentes básicos: sistemas de alimentação e coleta dos produtos, campo elétrico externo, mecanismos de carregamento e dispositivos de adesivos na trajetória das partículas dielétricas.

O potencial e/ou campo elétrico variam de acordo com o tipo de separador. Usualmente, opera-se com potenciais entre 10 a 100 kV, enquanto o campo elétrico está compreendido na faixa de 4×10^4 até 3×10^6 V/m (LAWVER e HOPSTOK, 1985).

A forma de um separador está essencialmente relacionada ao tipo de mecanismo utilizado no carregamento das diferentes espécies mineralógicas contidas no minério. Com efeito, existem dois tipos básicos de equipamentos: os eletrodinâmicos e os eletrostáticos. Nos primeiros, emprega-se o fluxo iônico com transferência de cargas, enquanto nos últimos não há fluxo iônico. Na prática, são encontrados os separadores eletrodinâmicos, comumente chamados "de alta tensão", e os separadores eletrostáticos de placas condutoras.

Separadores Eletrodinâmicos

Estes possuem a configuração esquematizada na Figura 16 na qual se observa o tambor rotativo (T) e aterrado, os eletrodos, a escova de limpeza e as várias trajetórias das partículas. A mistura, constituída de minerais com diferentes susceptibilidades à eletrização superficial, é alimentada em A, sobre a superfície do tambor que recebe o bombardeamento iônico (trecho BC) por meio do eletrodo de ionização. No eletrodo, é utilizada corrente contínua, potencial da ordem de 50 kV e, geralmente, polarização negativa. Os minerais sob intenso efeito corona carregam-se negativamente, permanecendo aderidos à superfície até penetrarem na região de ação do eletrodo estático (trecho CD). O eletrodo estático tem a função de reverter, por indução, as cargas das partículas condutoras, provocando o deslocamento lateral das partículas em relação à superfície do tambor, alterando a sua trajetória e coletando-as como material condutor. O material dielétrico permanece com carga negativa e, portanto, colado à superfície do tambor até ser removido com auxílio da escova e do eletrodo de corrente alternada. O dispositivo tem a função adicional de tornar mais eficiente o processo de limpeza com a escova.

As dimensões dos separadores são avaliadas em relação ao diâmetro e comprimento do tambor. Assim, são fabricados equipamentos com diâmetros que variam na faixa de 150 a 240 mm e comprimento de até 3 m. A capacidade é calculada em função da alimentação que atravessa o tambor nas unidades de tempo e de comprimento do mesmo (kg/h.m), podendo variar até 2.500 kg/h.m para o caso de minério de ferro e 1.000 kg/h.m, no caso de areia monazítica (MATHIEU e SEROIS, 1988).

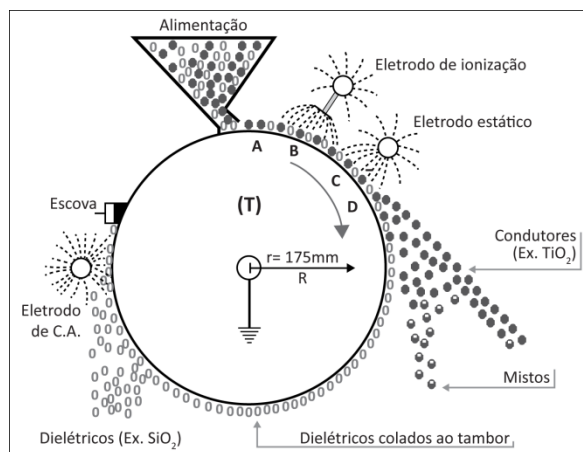


Figura 16. Diagrama esquemático do separador eletrodinâmico ou de alta tensão.

Separadores de Placas Condutoras

Os primeiros separadores eletrostáticos utilizados na prática foram aqueles compostos de duas placas, uma carregada negativamente e outra positivamente, com elevado gradiente de campo entre elas. Os equipamentos eram usados na separação de silvita-halita, feldspato-quartzo e apatita-quartzo. Entretanto, devido à maior eficiência, capacidade e versatilidade dos separadores eletrodinâmicos, como também à utilização do processo de flotação, tais equipamentos foram tornando-se obsoletos (JAIN, 1987).

O equipamento, conforme diagrama ilustrado na Figura 17, possui duas placas, uma condutora e outra constituída de um eletrodo gigante. Em alguns modelos, a placa condutora é constituída de uma tela. A operação das duas modalidades possui diferença apenas na coleta do material condutor. A alimentação é feita entre as placas e os minerais fluem livremente por gravidade. O carregamento por indução ocorre sobre a placa condutora pela ação do campo elétrico, devido ao eletrodo. Acontece, com isso, uma transferência de elétrons dos minerais condutores através da placa, tornando-os positivos. O procedimento resulta na atração das partículas condutoras pelo eletrodo, mudando a sua trajetória.

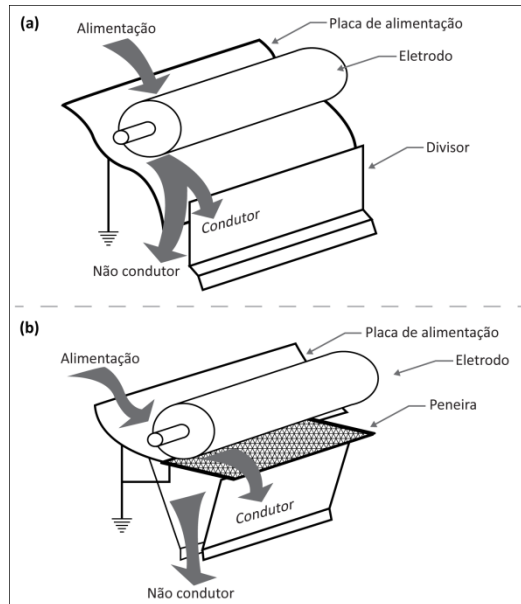


Figura 17. Diagrama ilustrativo dos separadores de placas condutoras.

As forças eletrostáticas que atuam nos separadores de placas condutoras são de baixa intensidade, limitando a aplicação dos mesmos à separação de minerais com granulometria mais grossa. Tal limitação é um fator coadjuvante que justifica o baixo uso dos equipamentos nas operações primárias de separação e, ainda, faz com que sejam raramente usados nas etapas de limpeza, como no caso das areias monazíticas.

Separadores Triboelétricos

A separação triboelétrica baseia-se na diferença de carga elétrica induzida em materiais não condutores, por meio do contato de suas superfícies (HEARN, 2014). De maneira simplificada, o processo de indução de cargas elétricas se dá por aquecimento ou por queda (*thumbling*) de partículas, promovendo o ganho de elétrons e, conseqüentemente, promovendo o aparecimento de carga superficial negativa em algumas partículas. As partículas com menor tendência a adquirir elétrons apresentarão carga superficial resultante positiva e essa diferença de cargas permite que ocorra a separação.

Um separador triboelétrico simples consiste de pratos verticais ou tubos, entre os quais as partículas pré-carregadas superficialmente se deslocarão. Devido às cargas opostas das extremidades dos pratos ou tubos, as partículas serão atraídas ou defletidas da superfície carregada. Os separadores de tubo são mais utilizados devido à rotação do cilindro facilitar a limpeza dos mesmos; já os pratos podem acumular partículas que, com o tempo, passam a isolar a superfície do separador, levando-o à inatividade (HEARN, 2014).

O uso da separação triboelétrica data dos anos de 1940, na separação de sais como coreto de potássio e cloreto de sódio. O modelo mais recente desse equipamento, de correias horizontais, é utilizado na separação de cinzas de material a base de carbono (carvão não queimado) em usinas termoelétricas (HEARN, 2014).

Influência do Ambiente Operacional

Toda e qualquer operação com energia sob a forma eletrostática está relacionada ao estado e à natureza das superfícies comprometidas com o processo e às condições do ambiente de operação. Assim, para se obter a eletrização superficial das partículas submetidas à separação eletrostática, estas devem possuir superfícies livres de contaminações e/ou sujeiras (matéria orgânica), e a área operacional deve estar isenta de poeira e umidade. Por tais razões, são introduzidas nas instalações industriais etapas de lavagem, atrição e secagem do material, antes da alimentação.

É comum a remoção da camada fina e superficial de lama da hematita antes da separação, o que proporciona uma variação na sua resistividade de 5×10^{-8} a $2 \times 10^{-2} \Omega\text{m}$ (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006). Outro fator indesejável ao processo é a poeira ou fração ultrafina do minério, que deve ser eliminada, conduzindo-se a operação em ambiente sob vácuo para minimizar seus efeitos (MATHIEU e SEROIS, 1988).

A etapa de secagem é usada como alternativa para eliminar a umidade do material. O procedimento não constitui uma dificuldade prática ao processo, porém, a manutenção do material em ambiente ausente de umidade tem sido um agravante oneroso. As operações com temperaturas elevadas, da ordem de 60°C , na separação eletrostática de rutilo, são usadas para diminuir as dificuldades causadas pela umidade. É conhecido que tal fator tem maior influência nos separadores eletrostáticos convencionais, comparados aos de alta tensão (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006). É importante salientar que cada minério tem suas características próprias e, igualmente, cada ambiente operacional tem sua influência especial. As razões justificam a construção de separadores com sistemas de bobinas, o que permite o aquecimento do material antes da alimentação, como também a utilização de um conjunto de luzes na região do campo elétrico.

Influência da Granulometria

Como na maioria dos processos na área de beneficiamento de minérios, as faixas granulométricas muito amplas não são adequadas à separação eletrostática. A dimensão e forma das partículas têm influência na ação do separador. Aquelas com granulometria grossa possuem carga superficial pequena devido à baixa superfície específica. Como consequência, a força eletrostática sobre as mesmas é menor que o peso individual de cada partícula. Tal fato justifica a existência de material grosso e condutor na fração não condutora, diminuindo a eficiência do processo. De outro modo,

partículas muito finas e condutoras tendem a permanecer com as não-condutoras nos leitos inferiores das mesmas sobre a superfície do rolo, diminuindo também o desempenho da operação.

Em virtude disso, é normal a prática operacional que utiliza múltiplos estágios de limpeza com a coleta adicional de uma fração mista, o que proporciona a obtenção de concentrados mais puros. Um bom procedimento consiste na otimização da faixa granulométrica mais adequada, sem perdas na eficiência do processo. Tal procedimento é feito com repetidos ensaios em escala de laboratório e/ou piloto para cada tipo de minério a ser tratado.

A maioria dos separadores eletrostáticos industriais opera de forma eficiente para partículas maiores que 75 μm ; por exemplo, é comum usar a faixa de 50 a 100 μm para o tratamento da areia monazítica. Entretanto, já existem equipamentos capazes de processar minérios com granulometria mínima de até 1 μm (BITTNER et al., 2014).

Principais Aplicações

Há limites para aplicação do processo de separação eletrostática, todavia, o método de separação é usado, tanto no processamento de minérios como em outras áreas, podendo ser citadas:

- concentração de minérios de ilmenita, rutilo, zircão, apatita, amianto, hematita e outros;
- purificação de alimentos, como remoção de certas impurezas contidas nos cereais;
- remoção do cobre em resíduos industriais reaproveitáveis;
- purificação dos gases em chaminés industriais, por meio de precipitação eletrostática.

A maior aplicação prática da separação eletrostática verifica-se no processamento de areias monazíticas e depósitos aluvionares contendo minerais de titânio. No primeiro caso, poucas são as operações industriais que não utilizam o processo. Na Flórida (EUA), registram-se elevadas produções de concentrado de minerais pesados combinando as operações de separação magnética e separação eletrostática na separação dos minerais. Isso é possível, pois, tanto os minerais magnéticos com os não magnéticos, que saíam juntos em uma operação de separação magnética, podem ser separados em uma operação de separação eletrostática por terem propriedades elétricas diferentes, sendo condutores ou não-condutores (BRONCALA, 1980; HEARN, 2014).

Em alguns casos, é empregada a separação gravítica na remoção de quartzo como etapa inicial do processo, seguida da separação magnética e, por último, a eletrostática. Tal procedimento pode ser observado em vários circuitos de processamento das areias monazíticas, conforme o diagrama de blocos da Figura 18.

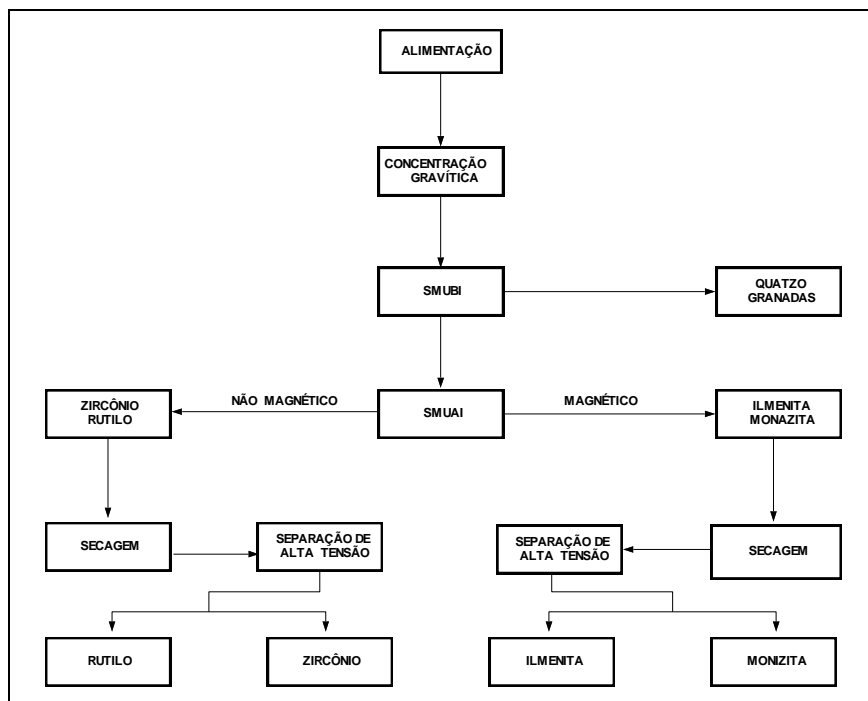


Figura 18. Diagrama simplificado de processo para recuperação de minerais pesados contidos em areia de cordões litorâneos (adaptado de LAWVER e HOPSTOK, 1985; WILLS e FINCH, 2016).

A tecnologia triboelétrica também tem sido amplamente utilizada, desde 1995, no beneficiamento de cinzas volantes de carvão, com cerca de 140 equipamentos em operação na América do Norte e Europa (BITTNER et al., 2014).

AVANÇOS NA SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA

Na área de separação eletrostática, os esforços de pesquisa são observados no desenvolvimento de separadores para partículas finas, com granulometria menor do que $75 \mu\text{m}$, que é a faixa de tamanho não atendida, com eficiência, pela maioria dos separadores eletrostáticos existentes no mercado.

A *Separation Technologies LLC*, empresa fabricante de equipamentos, desenvolveu um separador triboeletrostático, o separador ST, com tecnologia diferenciada para processar minérios de granulometria muito fina, de 1 a $500 \mu\text{m}$. Isso possibilitou a inclusão da separação eletrostática em diversas unidades industriais, para uma gama de minérios (BITTNER et al., 2014).

A separação triboeletrostática apresenta crescente aplicação, por exemplo, no beneficiamento a seco de carvões de granulometria muito finas, abaixo de $170 \mu\text{m}$ (BADA et al., 2010). Os resultados mostram redução de 55% no conteúdo de cinzas, um aumento efetivo no poder calorífico do carvão de 21,3 para 26,8 MJ/kg e redução de

enxofre de 1,7 para 0,5%. Youjun et al. (2015) reportam a eficiência do mesmo tipo de separador para carvões com granulometria ainda menor, na faixa de 37 a 74 μm . Outro ponto a ser ressaltado é que a operação a seco é bastante vantajosa, por eliminar a necessidade de secagem do produto e a gestão de rejeitos aquosos.

A possibilidade de processamento de minérios cada vez mais finos tem permitido a utilização eficiente da separação triboeletrostática no beneficiamento de uma variedade de minérios, como o carbonato de cálcio, talco e sais de potássio. Recentemente, a separação eletrostática a seco também foi aplicada, de forma eficiente, no beneficiamento de minérios de fosfato (BITTNER et al., 2014)

Outro tipo de separador eletrostático, caracterizado por um determinado número de eletrodos de coleta constituídos por tubos ocos com eletrodos de alta tensão ao longo do eixo do tubo, foi proposto por Mesenyashin (2000). Esse separador compreende vários tubos, com diâmetros variando de 80 a 200 mm. Comparando com o separador eletrostático convencional tipo tambor, a vantagem do equipamento consiste em aumentar a superfície de eletrodos de coleta e, como consequência, a capacidade por unidade de volume.

O tratamento químico dos minerais também pode ser utilizado como uma etapa auxiliar na separação eletrostática. A ativação de substâncias minerais contendo feldspato e quartzo tem permitido a obtenção de concentrados com 82% de feldspato, a partir de uma alimentação com 32% do mineral (MESENYASHIN, 2000).

Na área de minerais industriais, especialmente os de granulometria muito fina, de 1 a 300 μm , diversos autores apresentam a eficiência da separação triboeletrostática, a saber: Lewandowski e Butler (2016) reportam aumento na pureza de concentrados de barita, de 82% para 92% BaSO_4 , com recuperação em massa de 74%; Bittner et al. (2014) apresentam resultados de separação de magnesita do talco, com produção de concentrado de talco com 95% de pureza.

Moradi et al. (2017) utilizaram a separação eletrostática na purificação de diatomita, visando a remoção de carbonato de cálcio e outros minerais de ganga. Os autores concluíram que a tecnologia mostrou-se adequada à produção de diatomita de alta pureza, aplicável como auxiliar de filtração na indústria alimentícia.

Outra área de aplicação crescente da separação triboeletrostática é a de tratamento de resíduos sólidos contendo materiais poliméricos, como, por exemplo, na reciclagem de baterias de íon lítio (SILVEIRA, 2016). Embora as baterias de íon lítio apresentem composições variadas em seus catodos – LiFePO_4 , LiCo , LiMnO , etc. - o processo de separação eletrostática mostrou-se eficiente, permitindo a obtenção de uma fração condutora com 98,9% de metais e a fração não condutora com 99,6% de polímeros, evidenciando a alta pureza dos produtos obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARVIDSON, B.R.; NORRGRAN, D. Magnetic Separation. In: Mineral Processing and Extractive Metallurgy – 100 years of innovation (Ed. Anderson, C.G., Dunne, R.C., Uhrig, J.L.), Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. (SME), Englewood, Colorado, USA, 684p., p. 223-233, 2014.

ARVIDSON, B.R.; BARNEA, E. Recent advances in dry high-intensity permanent-magnet. Proceedings of the International Mineral Processing Congress, 14, Toronto, 1982.

BADA, S.O.; FALCON, R.M.S.; FALCON, S.M. The potential of electrostatic separation in the upgrading of South African fine coal prior to utilization — a review. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, v. 110, p. 691-702, 2010.

BEHARRELL, P.A. Applications of superconducting magnetic separation. Quantum Design Inc., 15p., 2015. www.qdusa.com/sitedocs/productBrochures/Applications_of_Superconducting_Magnetic_Separation_2016.pdf. Acesso em 05/09/2016.

BITTNER, J.D.; HRACH, F.J.; GASIOROWSKI, S.A.; CANELLOPOULOS, L.A.; GUICHERD, H. Triboelectric belt separator for beneficiation of fine minerals. *Procedia Engineering*, v. 83, p. 122-129, 2014.

BLAZY, P. La valorisation des minerais. Paris. Presses Universitaires de France. 416p. p. 166-175, 1970.

BRONCALA, W.J. Magnetic separation. In: MULAR A.L.; BHAPPU, R.B. (ed). Mineral processing plant design. (s.d.): Society of Mining Engineers, 946p. p. 467-478, 1980.

DASTMANN, C.H. and UNKELBERG K.H. Optimization of superconducting magnetic system for a commercial scale high field drum separator. XIV International Mineral Processing Congress. Amsterdam: Elsevier Science Publishing Company Inc. 2v, v.1, p. 905-915, 1988.

DOBBINS, M.; DUNN, P. and SHERRELL, I. Recent advances in magnetic separator designs and applications. Proceedings of The 7th International Heavy Minerals Conference 'What next', The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, p. 63-69, 2009.

ERIEZ. Ferrous Wheel - high gradient magnetic separator. Ref. MMPB-738G. Eriez Magnetics, 2001. <https://eriez.mx/wp-content/uploads/2015/02/ferrous-wheel.pdf>. Acesso em 03 dezembro 2017.

GONÇALVES, C.C., BRAGA, P.F.A. In-depth characterization and preliminary beneficiation studies of heavy minerals from beach sands in Brazil. Proceedings of The 10th International Heavy Minerals Conference 'Expanding the Horizon', The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, p. 289-302, 2016.

GONZAGA, L.M. Separação magnética a úmido de minérios de ferro itabiríticos. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

HEARN, S. Innovations in Electrostatic Separation. In: Mineral Processing and Extractive Metallurgy – 100 years of innovation (Ed. Anderson, C.G.; Dunne, R.C.; Uhrie, J.L.), Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. (SME), Englewood, Colorado, USA, 684p., p. 235-242, 2014.

HUANG, Y.; KELLER, A.A. EDTA functionalized magnetic nanoparticle sorbents for cadmium and lead contaminated water treatment. *Water Research*, v. 80, p. 159-168, 2015.

INBRAS. Manual de instrução, operação e manutenção - separador magnético de baixa intensidade, via úmida, tipo "WD", 06/2010, 20p., 2010.

INCULET, I.I. Electrostatic mineral separation. New York: Research Studies Press Ltd., 153p., 1984.

JAIN, S.K. Ore processing. A.A. Balkema: Indian Edition Series 15. 518p. p. 338-364, 1987.

KAJIKAWA, K.; AWAJI, S.; WATANABE, K. AC loss evaluation of an HTS insert for high field magnet cooled by cryocoolers. *Cryogenics*, n. 80, p. 215-220, 2016.

KELLEY, E.G.; SPOTTISWOOD, D.J. Introduction to mineral processing. New York: John Wiley and Sons. 491p., p. 274-300, 1982.

LAWVER, E.J.; HOPSTOK, D.M. Electrostatic and magnetic separation. In: WEISS, N. L. (ed) SME mineral processing handbook. Society of Mining Engineers, p. 6.1-6.48, 1985.

LAWVER, J.E; HOPSTOCK, D.M. Wet magnetic separation of fine weakly magnetic minerals. *Minerals Science Engineering*, v. 6, issue 3, p. 154-172, 1974.

LEWANDOWSKI, L. e BUTLER, R. Beneficiation of industrial minerals using a triboelectrostatic belt separator. Industrial Minerals International Congress and Exhibition 2016, Czech Republic, 2016. In: <http://www.indmin.com/events/download.ashx/document/speaker/8915/a0ID00000ZwxAGMAZ/Presentation>. Acesso em 01 novembro 2017.

LUZ, A.B. e ALMEIDA, S.L.M. Manual de Usinas de Beneficiamento, Rio de Janeiro - CETEM/CNPq/DNPM/FINEP, 88p., 1989.

MATHIEU, G.I.; SEROIS, L.L. Advances in technology of magnetic separation. In FORSSBERG, (ed.) International Mineral Processing Congress, 11 Science Publishers B.V. Amsterdam: Elsevier, p. 937-950, 1988.

MESENYASHIN, A.I. Novel tubular electrostatic separators. In: XXI International Mineral Processing Congress, Rome, Italy, July 23-27, A7. p. 89-94, 2000.

METSO. Enrichment. Basics in mineral processing. Ed. 10, Metso Corporation, p. 5 (1-46), 2015. www.metso.com.

MIHALK, P. Magnetic separation theory equipment and application. *Word Mining*, p. 105-106, Sept., 1979.

MORADI, S.; MOSELEY, D.; HRACH, F.; GUPTA, A. Electrostatic beneficiation of diatomaceous earth. *International Journal of Mineral Processing*, v. 169, p. 142-161, 2017.

MURRAY, H.H. Magnetic as a separation technique. In: SOMASUNDARAM, P. (ed). *Advances in mineral processing*. Settleton: Society of Mining Engineers, 756p. p. 335-354, 1986.

NORRGRAN, D.A. Advances in mineral separation of fine high-purity products. *Ceramic bulletin*, v. 69, 1990.

OKA, T.; TANAKA, K.; KIMURA, T.; MIMURA, D.; FUKUIA, S.; OGAWA, J.; SATOA, T.; OOIZUMI, M.; YOKOYAMA, K.; YAMAGUCHI, M. Magnetic separation technique for environmental water purification by strong magnetic field generator loading HTS bulk magnets. *Physica C: Superconductivity*, v. 470, Issue 20, p. 1799-1803, 2010.

REDDY, D.H.K.; YUN, Y. Spinel ferrite magnetic adsorbents: Alternative future materials for water purification? *Coordination Chemistry Reviews*, v. 315, p. 90-111, 2016.

RIBEIRO, J.P.; RIBEIRO, C.H.T. The noBLOCK technology - a major breakthrough in wet high intensity magnetic separation (WHIMS). *REM - Revista da Escola de Minas*, 68(3), p. 361-366, 2015.

SAMPAIO, J.A.; LUZ, A.B. e LINS, F.F. *Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil*, p. 16-17, CETEM/MCT, 398p., 2001.

SILVEIRA, A.V.M. Aplicação da separação eletrostática na separação de resíduos poliméricos e baterias de íon lítio. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 137p., 2016.

STEINBERG, M.; GERARDS, M.; HUBEN, J. Feasibility analysis of the improvement of the JONES WHIMS magnetic separator focused on the reduction power consumption, 616/IMPC 2014/volume II. XXVII International Mineral Processing Congress, Yianatos, J. (Ed.), Santiago, Chile, 2014.

SVOBODA, J; FUJITA, T. Innovation in magnetic techniques of material treatment: technology at a crossroad. *Proceeding of the XXII International Mineral Processing Congress*, Lorenzen, L. (Ed.), p. 261-269, Cape Town, South Africa, 2003.

TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA In Memoriam Professor Paulo Abib Andery. Fundação Instituto Tecnológico de Pernambuco. 399p. p. 188-204, 1980.

WASMUTH. H.D.; UNKELBAC, K.H. Recent developments in magnetic separation of feebly magnetic minerals. *Minerals Engineering*, Oxford, v. 8, n. 7-11. p. 825-837, 1991.

WILLS, B.A.; FINCH, J.A. Magnetic and electrical separation. In: Wills' Mineral processing technology - An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 8th Edition, Elsevier, 498p. p. 381-408, 2016.

WILLS, B.A.; NAPIER-MUNN, T. Wills' Mineral Processing Technology - An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 7th Edition, Elsevier. 444p. p. 353-372, 2006.

YOUJUN, T.; QINGQING, D.; MINGRUI, D.; DONGPING, T.; XU, W.; JIE, Z. Electrical properties of fly ash and its decarbonization by electrostatic separation. *International Journal of Mining Science and Technology*, v. 25, p. 629-633, 2015.

ZHANG, H.; ZHAO, Z.; XU, X.; LI, L. Study on industrial wastewater treatment using superconducting magnetic separation. *Cryogenics*, v. 51, Issue 6, p. 225-228, 2011.

APÊNDICE

Tabela A1 – Atratividade Relativa (AR) de Minerais.

MINERAL	ORIGEM DA AMOSTRA	AR*	MINERAL	ORIGEM DA AMOSTRA	AR*
Grupo 1 – Ferromagnéticos (Campo magnético requerido para separação - 500 a 5.000 G)					
Ferro		100	Magnetita	Port Henry, N.Y.	14,18
Magnetita	-	48,00	Franklinita	Franklin Furnace, N.J.	13,09
Grupo 2 – Moderadamente magnéticos (Campo magnético requerido para separação - 5.000 a 10.000 G)					
Ilmenita	Edge Hill, Pa.	9,14	Franklinita	Franklin Furnace, N.J.	1,48
Pirrotita	Sudbury, Ontario	2,49			
Grupo 3 – Fracamente magnéticos (Campo magnético requerido para separação - 10.000 a 18.000 G)					
Hematita	Lake Superior District	0,77	Bornita	NS Wales, Australia	0,09
Siderita	Roxbury, Conn.	0,74	Apatita	Eganville, Ontario	0,08
Rodonita	Franklin Furnace, N.J	0,56	Tetrahedrita	Peru	0,08
Limonita	Nova Escocia	0,31	Willemita	Franklin Furnace, N.J.	0,08
Braunita	Itália	0,30	Bornita	Union Bridge, Maryland	0,07
Corindon	Gaston County, N.C.	0,26	Esfarelita	Lowa	0,06
Hematita	Inglaterra	0,26	Cerussita	Austrália	0,06
Pirolusita	Bartow County, Ga.	0,25	Dolomita	Sing Sing, N.Y	0,06
Manganita	Nova Escocia	0,19	Psilomelana	North Mt.Mine, Arkansas	0,06
Calamina	Friedensville, Pa.	0,19	Arsenopirita	Action, York Co., Maine	0,05
Esfarelita	Frieburg, Alemanha	0,18	Sphene (Titanite)	Ontario	0,05
Siderita	Desconhecido	0,16	Calcoprita	Austrália	0,05
Rodocrosita	Argentina	0,15	Molibdenita	NS Wales, Australia	0,05
Granada	-	0,15	Talco	Swain Co., N.C	0,04
Serpentinita	-	0,14	Celestita	Strontium Island	0,04
Molibdenita	Frankford, Pa.	0,12	Calcocita	Butte, Montana	0,04
Mica	Bengal, India	0,12	Cinábrio	New Almaden, California	0,04
Corindon	Lehigh Co., Pa.	0,11	Gesso	Derbyshire, England	0,04
Cerargyrita	Novo México-USA	0,11	Zinco	Franklin Furnace, N.J.	0,04
Huebnerita	Henderson, N.C.	0,11	Ortoclássio	Elam, Pa.	0,04
Wolframita	Chochiwon, Kenya	0,11	Epidoto	-	0,03
Wolframita	Clima, Colorado	0,10	Hornblenda	-	0,03
Grupo 4 – Debilmente magnéticos (Campo magnético requerido para separação - acima de 18.000 G)					
Pirita	Rio Tinto, Espanha	0,02	Chisocola	Miami, Arizona	0,006
Smithsonita	Kelly, N.M.	0,02	Rutilo	Desconhecido	0,003
Esfalerita	Joplin, Mo.	0,02	Mica, rubi	Bengal, India	0,003
Estibinita	Alemanha	0,02	Ortoclássio	Alexandria, N.Y.	0,003
Criolita	Greenland	0,02	Calcário	-	0,002
Enargita	Butte, Montana	0,02	Cobalita	-	0,002
Senarmonita	-	0,02	Safira	-	0,002
Magnesita	Lancaster Country, Texas	0,02	Pirita	-	0,002
Azurita	Chessy, França	0,02	Cassiterita	Cornwall, Inglaterra	0,002
Gipsita	Grand Rapids, Michigan	0,02	Turmalina	-	0,001
Malaquita	Katanga, Africa	0,02	Dolomita	-	0,001

Fonte: Eriez Magnetic

Tabela A1 – Atratividade Relativa (AR) de Minerais (Continuação).

MINERAL	ORIGEM DA AMOSTRA	AR*	MINERAL	ORIGEM DA AMOSTRA	AR*
Grupo 4 – Debilmente magnéticos (Campo magnético requerido para separação - acima de 18.000 G)					
Nicolita	Bebra Hesse, Alemanha	0,016	Spinélio	-	0,0010
Serpentinita	-	0,016	Berilo	-	0,0008
Stibnita	Juab County, Utah	0,013	Rubi	-	0,0008
Dioptaso	-	0,012	Covelita	Butte, Montana	0,0007
Turmalina	-	0,001	Feldspato	-	0,0006
Cuprita	Cornwall, Inglaterra	0,009	Esfalerita	Jefferson City, Tenn.	0,0005
Galena	Galena, Ill	0,009	Zircão	-	0,0002
Grupo 5 – Não magnéticos e diamagnéticos					
Barita	Bartow County, Ga.	0,0	Corindon	-	- 0,0006
Adularia	-	- 0,0004	Topazio	-	- 0,0006
Calcita	-	- 0,0004	Galena	-	- 0,0011
Fluorita	-	- 0,0004	Antimonio, nativo	-	- 0,0023
Sphalerita	-	- 0,0004	Apatita	-	- 0,0034
Celestita	-	- 0,0005	Argonita	-	- 0,0048
Quartzo	-	- 0,0005	Grafita	Ceylon	- 0,0320

(*)Nota: A atratividade relativa (AR) variará segundo a origem da amostra

As atratividades foram calculadas usando o volume de susceptibilidade de 250.000×10^{-8} como igual a 100 (ferro metálico)

Fonte: Eriez Magnetic