

CETEM

**Centro de Tecnologia Mineral
Ministério da Ciência e Tecnologia**

Coordenação de Processos Mineraiis – COPM

Separação Magnética e Eletrostática

João Alves Sampaio
Adão Benvindo da Luz
Silvia Cristina Alves França

**Rio de Janeiro
Agosto/2010**

CCL00310010

**Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios, 5ª Edição – Capítulo 9 – pág. 367–395.
Editores: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e
Silvia Cristina A. França.**

SEPARAÇÃO MAGNÉTICA E ELETROSTÁTICA

João Alves Sampaio

Engenheiro de Minas pela UFPE, Doutor em
Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE-UFRJ
Tecnologista Sênior do CETEM/MCT

Adão Benvindo da Luz

Engenheiro de Minas pela UFPE, Doutor em
Engenharia Mineral pela USP
Pesquisador Titular do CETEM/MCT

Silvia Cristina A. França

Engenheira Química pela UFS, Doutora em
Engenharia Química pela PEQ-COPPE-UFRJ
Tecnologista Sênior do CETEM/MCT

SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

Introdução

Materiais magnéticos do tipo magnetita, que atuam como magnetos e são capazes de remover minerais de ferro, são conhecidos desde os primórdios da civilização. No entanto, o significado prático da separação magnética só foi reconhecido no século XIX ⁽¹⁾.

Hoje, a separação magnética é um método consagrado na área de processamento de minérios para concentração e/ou purificação de muitas substâncias minerais. Pode ser empregada, 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 ferromagnéticos, os quais são atraídos fortemente pelo campo, e os paramagnéticos, que são atraídos fracamente. Aqueles que são repelidos pelo campo denominam-se de diamagnéticos.

A separação magnética é uma técnica amigável ambientalmente 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 granulometria grossa e o a úmido para aquelas mais finas. Na história da separação magnética verifica-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. São conhecidos separadores magnéticos que operam industrialmente com um campo que varia de 5 a 6 T, sendo, 1 tesla (T) = 10^4 Gauss, que corresponde a $1 \text{ N A}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ^(1,2,3,4).

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 reciclagem de metais contidos em resíduos industriais, etc. ⁽¹⁾

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) ou supercondutores ou magnetos permanentes. O desenvolvimento dos materiais

magnéticos, 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), denominados de matriz, no campo magnético do separador. Essas matrizes, quando magnetizadas, geram um gradiente magnético local, resultando em maior força magnética que atua sobre a partícula ⁽¹⁾.

Fundamentos Teóricos

Relação entre Grandezas Magnéticas Utilizadas na Separação Magnética

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.

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 vetoriais e, portanto, possuem módulo, direção e estão relacionadas pela 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 Mineraias 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 de minerais submetidas à ação do campo.

Seja o campo magnético, H_z , produzido por um solenoide de laboratório, conforme Figura 1. No gráfico da direita 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 nas extremidades. Se a

corrente através do solenoide é reduzida 10 vezes, o campo magnético em todos os pontos será proporcionalmente reduzido de 10 vezes, e o consumo de energia será reduzido 100 vezes. Quando se coloca 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. De tal forma, observa-se que a força é maior onde há maior gradiente de campo e, no centro do solenoide, são nulos o gradiente e a força magnética⁽³⁾.

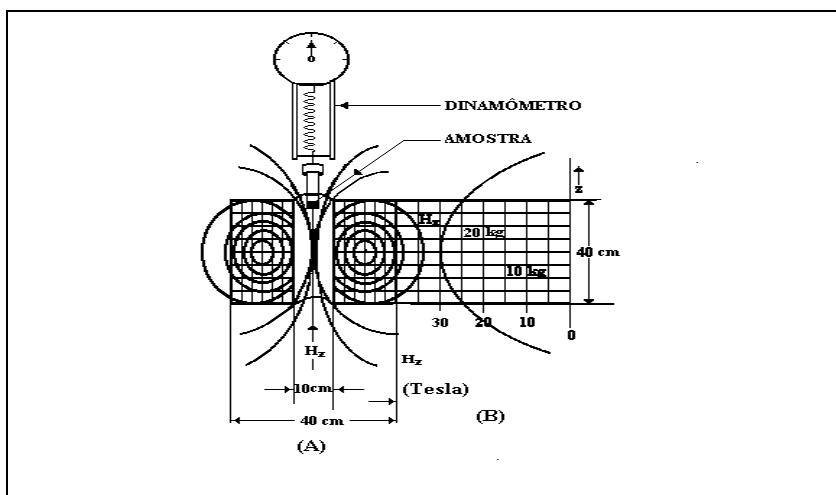


Figura 1 – Campo magnético no interior de um solenoide e a representação gráfica do mesmo⁽³⁾.

Quando a amostra está na parte superior do solenoide, os pesos aparentes da hematita e magnetita aumentam com o aumento do campo, mas 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.

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, detém força magnética muitas vezes maior do que o seu peso, mesmo sob ação de um campo com baixa intensidade.

Em anexo, encontra-se uma relação dos principais minerais, indicando a faixa de campo magnético nas quais os mesmos podem ser separados pelo processo de separação magnética.

Tabela 1 – Medidas da força magnética sobre amostras de 1 g de quartzo, hematita e magnetita suspensas no eixo de um solenoide.

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	$1,7 \times 10^{-2}$ T/cm
Quartzo	$-1,54 \times 10^{-4}$	$-1,54 \times 10^{-2}$
Hematita	$6,43 \times 10^{-4}$	$6,43 \times 10^{-1}$
Magnetita	15,8	158

O fenômeno que governa a separação magnética está relacionado a duas questões básicas: o comportamento das partículas de minerais diferentes quando expostas a um mesmo campo magnético e, a segunda questão, às forças magnéticas que atuam sobre elas⁽⁴⁾.

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 (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.

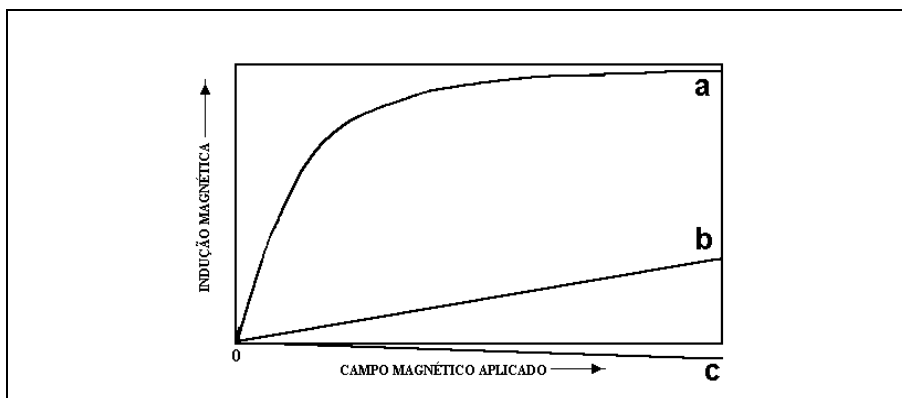


Figura 2 – Indução magnética para diferentes espécies mineralógicas: (a) ferromagnéticas, (b) paramagnéticas e (c) diamagnéticas.

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 especial que é função das dimensões do material magnetizado. Essa variação de campo, também chamada de gradiente, resulta numa 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 das linhas de fluxo. A Figura 3 ilustra muito bem esse fato: em **A** tem-se um campo uniforme e, em **B**, um campo convergente. 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.

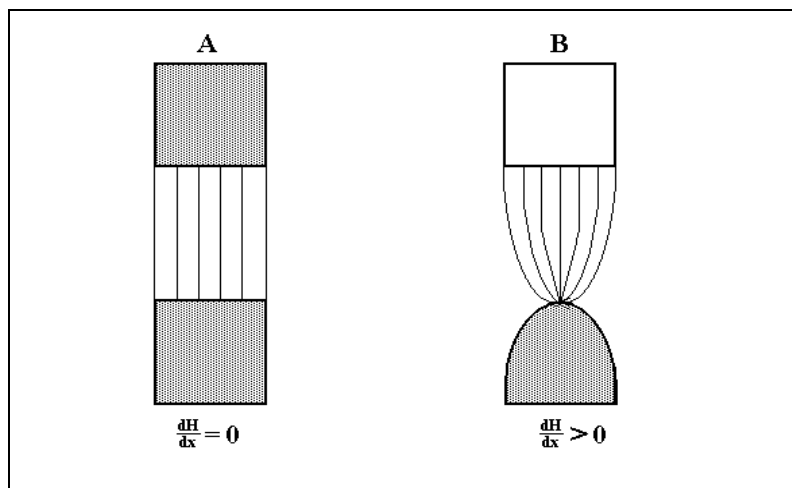


Figura 3 – Campo magnético uniforme (A) e convergente (B), apresentando o gradiente de campo.

Descrição dos Equipamentos

Há uma variedade de separadores magnéticos que podem ser classificados, de acordo com o uso, em dois grupos: separadores a seco e a úmido. Eles 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. 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. No Diagrama apresentado na Figura 4, ilustra-se a classificação, as características e aplicações dos separadores, englobando os critérios de classificação já discutidos.

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 3 B). 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, lâ de aço, etc. A matriz deve ser escolhida de modo a se ajustar às características do minério, inclusive contribuir ao melhor desempenho da separação. No processo de seleção da matriz devem ser feitas, entre outras, as seguintes considerações:

- (i) gradiente máximo de campo;
- (ii) área superficial de captação por unidade de volume da zona da matriz;
- (iii) capacidade de limpeza da matriz (remoção das partículas magnéticas) com rapidez para manter o sistema de fluxo contínuo;
- (iv) porosidade da matriz para permitir a vazão da polpa; caso ela tenha um valor muito baixo, é necessária maior pressão para obter a vazão ideal sem obstrução;
- (v) o material usado na fabricação das matrizes deve reter o mínimo de magnetização quando as mesmas são removidas do campo; no caso de a matriz reter quantidade significativa de magnetização, torna-se impossível a remoção das partículas magnetizadas.

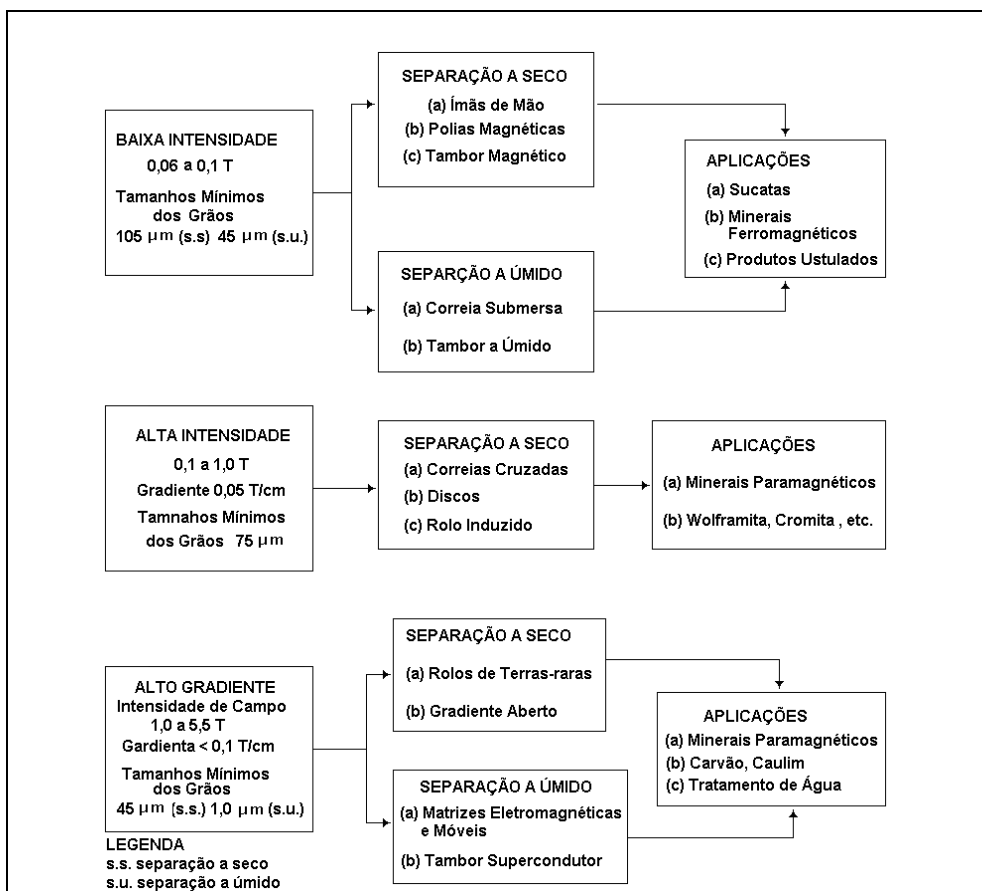


Figura 4 – Diagrama contendo as características, classificação e aplicações dos separadores magnéticos.

Separador Magnético a Úmido de Alta Intensidade para Laboratório

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 da separação nas faixas granulométricas finas, proporcionou vantagens significativas comparados aos demais. A sua aplicação, devido à operação sempre com alta intensidade, restringe-se, em geral, aos minerais paramagnéticos^(4,7,8).

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 dos minerais, mesmo utilizando pressões de 40 a 50 psi na água de lavagem.

Na Tabela 2 ilustra-se uma lista de cinco grupos de minerais classificados como ferromagnéticos: moderadamente magnéticos, fracamente magnéticos, debilmente magnéticos, não magnéticos e diamagnéticos. Também são indicadas as faixas de intensidade de campo magnético para esses minerais. Na Tabela 3, consta a atratividade relativa dos minerais.

Na Figura 5(a) ilustra-se, de forma esquemática, um separador magnético tipo Jones, usado em operação de laboratório. Um elevado campo magnético é aplicado nas matrizes situadas na caixa 12. 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 2,0 s, enquanto as não magnéticas atravessam tal região e são descarregadas em um recipiente coletor.

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⁽⁵⁾ são acionados, um após o outro. O procedimento permite regular a pressão da água de lavagem, que é uma variável a ser controlada e está ligada a outros fatores, como a susceptibilidade magnética dos minerais. O tempo de lavagem na operação é estimado em 1,5 s. Nele são coletadas as 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, segundo 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), ilustram-se 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. 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 a uma região de campo com baixa intensidade. Nesta região, as partículas magnéticas remanescentes na matriz são descarregadas por meio de um jato d'água e, assim, torna-se possível a coleta da fração magnética num determinado ponto da calha coletora. 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.

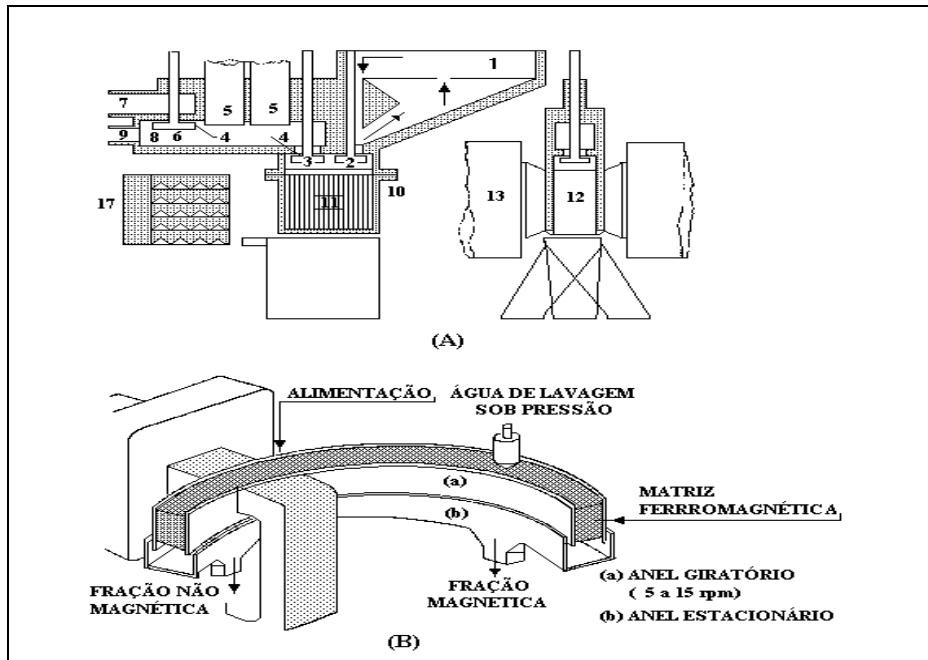


Figura 5 – Diagrama representativo dos separadores a úmido de alta intensidade para laboratório (A) e de carrossel (B) para circuito contínuo.

Separador de Correias Cruzadas

O separador, conforme ilustrado na Figura 6, 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, 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 ⁽⁷⁾.

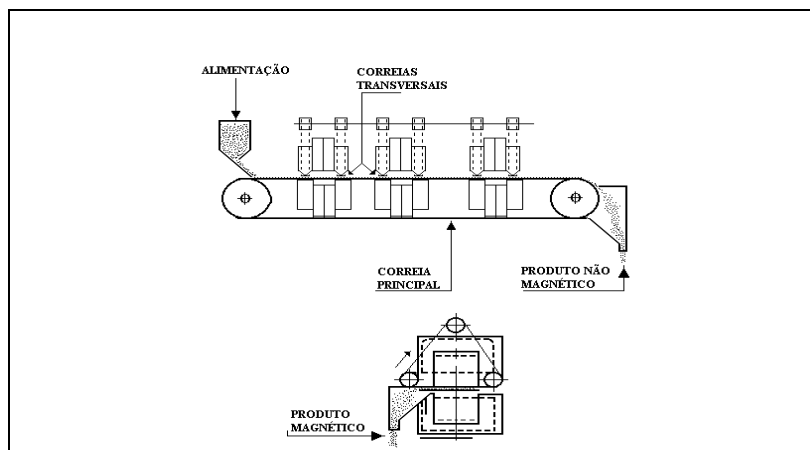


Figura 6 – Diagrama esquemático de um separador magnético de correias cruzadas.

Os minerais a serem separados são introduzidos sob a forma de uma camada fina sobre a correia principal. Os magnéticos são suspensos e retidos na correia secundária, que se desloca transversalmente à principal, transportando-os para uma região ausente de campo, seguida da 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 6.

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⁽⁸⁾. 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 terminal da correia. Como consequência permite-se a separação seletiva de materiais, com diferentes susceptibilidades, em um mesmo separador. Os principais parâmetros operacionais do separador são:

- (i) velocidade das correias, o "vão" entre os polos e a taxa de alimentação;
- (ii) o fluxo magnético, que aumenta no sentido da alimentação à extremidade oposta do separador.

Separador de Rolo Induzido

Em tal 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 "vão" entre o polo e o rotor pode ser ajustado para qualquer posição, sendo usual trabalhar com abertura bem menor, comparada com as de outros separadores. Como o fluxo magnético é uma função inversa do quadrado do "vão", as forças de campo mais intensas são obtidas com o

"vão" 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 magnéticas permanecem inalteradas. Tal fato confere às partículas magnéticas e não magnéticas trajetórias diferentes, sendo coletadas separadamente, conforme se observa na Figura 7.

Os separadores de rolo induzido são usados na remoção das impurezas ferruginosas contidas nos concentrados de sílica (areia), feldspato, barita, entre outras. Como etapas de concentração, são usados nos circuitos de beneficiamento de minerais paramagnéticos, tais como: monazita, cromita, granada, wolframita, etc.

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 de caso a caso. No entanto, a faixa de operação situa-se entre 17.700 a 35.400 kg/h.m de largura do rolo⁽⁹⁾.

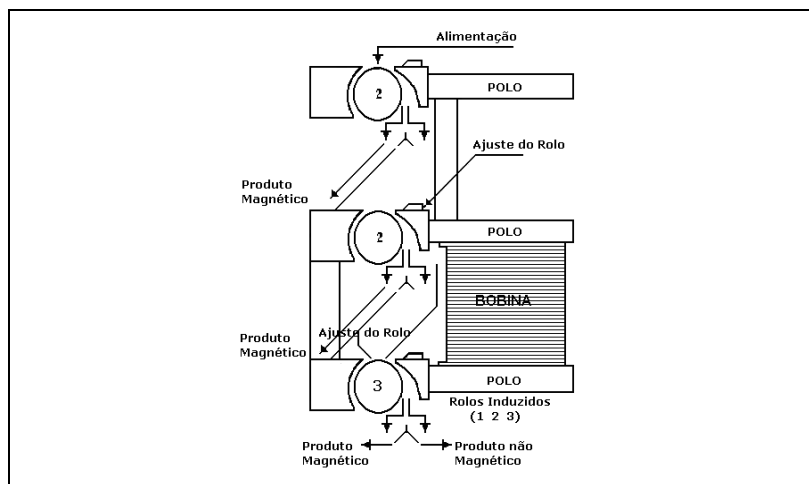


Figura 7 – Diagrama esquemático de um separador magnético de rolo induzido.

Considerações Finais

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 susceptibilidade e, com alta intensidade, separam-se aqueles com valores mais baixos da 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, 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 oclusões de minerais não magnéticos dentro dos focos magnéticos, prejudicando a separação a seco, principalmente, quando se trabalha com material fino e de elevada susceptibilidade. Tal contaminação deve-se não só à formação de focos como 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 Práticas

Na área de concentração de minérios, a principal aplicação prática da separação magnética a úmido de alta intensidade é feita pela Vale, em Itabira – MG, onde são usados separadores de carrossel, tipo Jones-Humbolt, na concentração de hematita.

A utilização desse tipo de separador, no início da década de 70, permitiu à Vale viabilizar o aproveitamento de itabiritos, até então não considerados como minério de ferro ⁽¹¹⁾.

Outra grande 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, onde são utilizados separadores magnéticos criogênicos, tipo Carpco, gerando campo magnético da ordem de 5,0 T ⁽¹²⁾. Outras utilizações são a seguir enumeradas:

- (i) remoção de impurezas magnéticas de concentrados de cassiterita, scheelita, cromita, areia quartzosa e do feldspato;
- (ii) remoção da magnetita do amianto e dos minérios fosfatados;
- (iii) purificação do talco, na recuperação de wolframita e minerais sulfetados de molibdênio, contidos em rejeitos de beneficiamento;
- (iv) no beneficiamento de minérios de urânio e de minerais pesados (ilmenita, rutilo).

A remoção, por separação magnética, da pirita contida no 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 da água. Por meio do uso de separadores com supercondutores, pode-se remover as impurezas magnéticas, em alguns casos cancerígenas, como também certos vírus e/ou bactérias que podem associar-se ao material magnético. Tal área de aplicação é, sem dúvida, o maior potencial que se conhece, no presente, para o uso da separação magnética. Com o advento dos supercondutores, tal expectativa pode tornar-se uma realidade bem próxima ^(1,12).

Avanços na Separação Magnética

O uso da tecnologia de supercondutores combinada ao princípio da separação magnética em tambor resultou num avanço significativo 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 num 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 ⁽¹³⁾:

- (i) 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;
- (ii) 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;
- (iii) 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;
- (iv) pode-se operar um mesmo sistema tanto a seco quanto a úmido, modificando apenas a posição do tambor.

Embora os separadores com supercondutores inserem razões que justificam sua utilização, ainda são encontradas dificuldades na sua aplicação em alta escala⁽²⁾. 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 da ordem 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.

O elevado custo da energia elétrica constitui um dos obstáculos à utilização do processo de separação magnética. Um avanço foi dado na construção de ímãs permanentes usando ligas de samário-cobalto (Sm-Co) e de neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B), possibilitando a obtenção de um ímã permanente capaz de induzir um campo com intensidade de 1,8 T e também gradiente elevado^(14,15). As características tanto de campo quanto de gradiente são similares às aquelas obtidas com separadores que utilizam eletroímãs. O novo tipo de equipamento proporciona, entre outras, as seguintes vantagens⁽¹⁶⁾.

- (i) ausência do *gap*, que assegura maior densidade de fluxo magnético, mesmo para o caso de alimentação com granulometria grossa (até 4,0 mm);
- (ii) custos operacional e de capital baixos para instalação de capacidade média, viabilizando, em particular, sua aplicação às purificações de refratários, materiais cerâmicos e minerais industriais;
- (iii) possibilidade de operação com materiais contaminados com substâncias ferromagnéticas e ausência de aquecimento, comum aos eletroímãs;
- (iv) flexibilidade operacional que permite variar o campo magnético mediante o deslocamento do tambor.

Espera-se, no entanto, o desenvolvimento de novos materiais para construção de ímãs permanentes, em decorrência dos elevados custos de obtenção dos elementos de terras-raras.⁽¹⁶⁾ Sabe-se que a área de aplicação para esse novo tipo de equipamento está assegurada. Existe, todavia, a expectativa de desenvolvimento de equipamentos com maior desempenho, visando o aumento da capacidade e a redução do custo por unidade instalada. Trata-se da falta de aperfeiçoamento adicional dos separadores que utilizam bobinas eletromagnéticas, com exceção para aqueles que utilizam supercondutores.

SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA

Introdução

A separação eletrostática é um processo de concentração de minérios que se baseia nas diferenças de algumas das propriedades dos minérios, 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 elétricos⁽¹⁶⁾:

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

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⁽¹⁷⁾. 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 obtidos nas áreas de eletricidade e eletrônica, tornou-se a separação eletrostática competitiva, se comparada com outros processos na área do processamento 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. Para os equipamentos, ditos modernos, tal granulometria mínima situa-se em torno de $20 \mu\text{m}$ ⁽¹⁶⁾.

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, pois Thales de Mileto (500 a. C.) observou que o âmbar atritado tinha o poder de atrair pequenas partículas de minerais⁽¹⁹⁾.

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 eles, fenômeno ainda sem explicação⁽¹⁸⁾. 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 8. Essas ficam então aderidas à superfície como consequência da atração eletrostática.

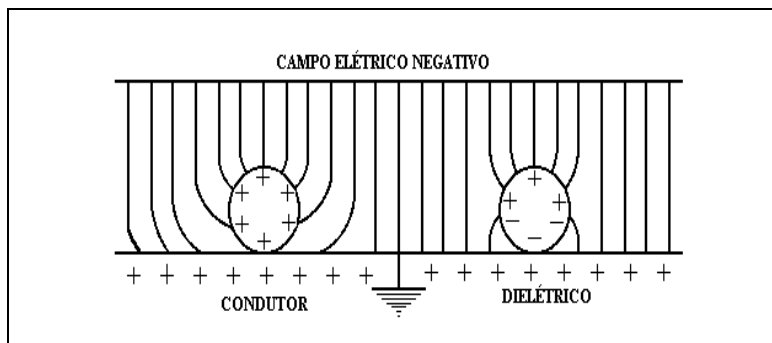


Figura 8 – Diagrama representativo de duas partículas após o carregamento por indução.

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, nas 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 $0,25 \text{ mm}^{(5)}$. 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 num 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^(20,21).

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 coladas à mesma. A força que mantém as não condutoras coladas à superfície é chamada de "força de imagem"⁽⁸⁾.

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 $3 \times 10^6 \text{ V/m}^{(5)}$.

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

Eles possuem a configuração esquematizada na Figura 9, 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⁽⁵⁾.

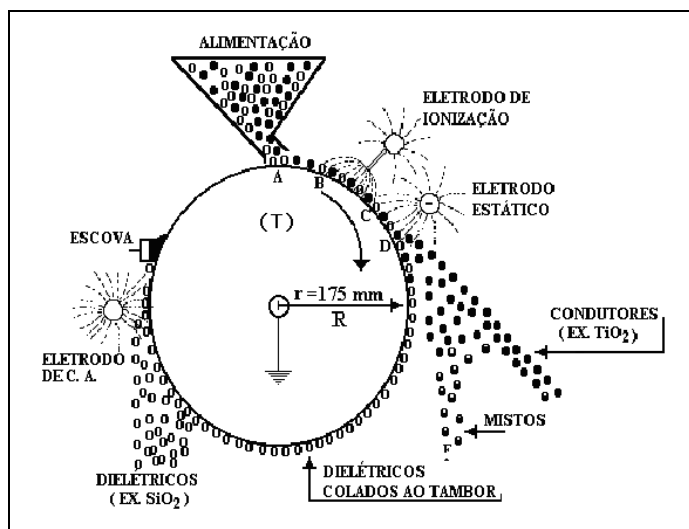


Figura 9 – Diagrama esquemático do separador eletrodinâmico ou de alta tensão.

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 fosfato-quartzo. Atualmente são obsoletos, devido à maior eficiência, capacidade e versatilidade dos separadores eletrodinâmicos, como também, à utilização do processo de flotação⁽⁸⁾.

O equipamento, conforme diagrama ilustrado na Figura 10, 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.

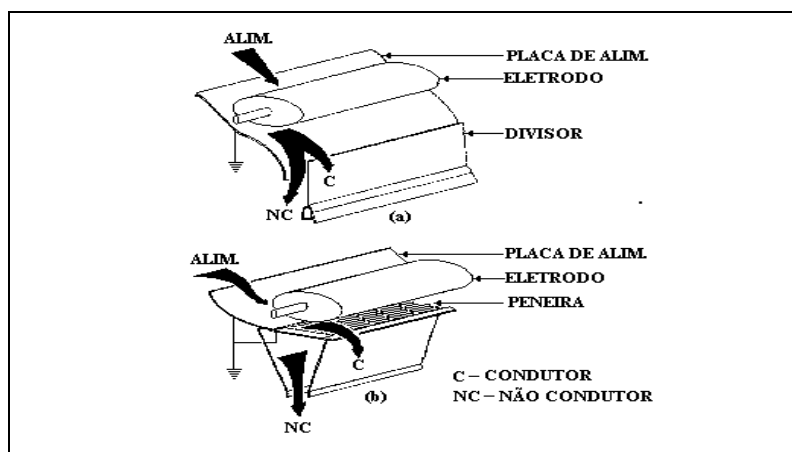


Figura 10 – Diagrama ilustrativo dos separadores de placas condutoras.

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. Espera-se que com o aperfeiçoamento dos separadores eletrodinâmicos, os de placas condutoras tenham apenas valor histórico.

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, as partículas 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 $2 \times 10^{-2} \Omega\text{m}^{(8)}$. 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⁽⁵⁾.

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⁽⁸⁾ que tal fator tem maior influência nos separadores eletrostáticos convencionais comparados aos de alta tensão. 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. É comum usar a faixa de 50 a $100 \mu\text{m}$ para o tratamento da areia monazítica.

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:

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

A maior aplicação prática da separação eletrostática se verifica no processamento de areias monazíticas e depósitos aluvionários contendo minerais de titânio. No primeiro caso, poucas são as operações que não utilizam o processo. Na Flórida (EUA), registram-se elevadas produções de concentrado de minerais pesados combinando as operações magnética e eletrostática⁽⁸⁾. Em alguns casos, é empregada a separação gravítica na remoção da sílica, 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 11.

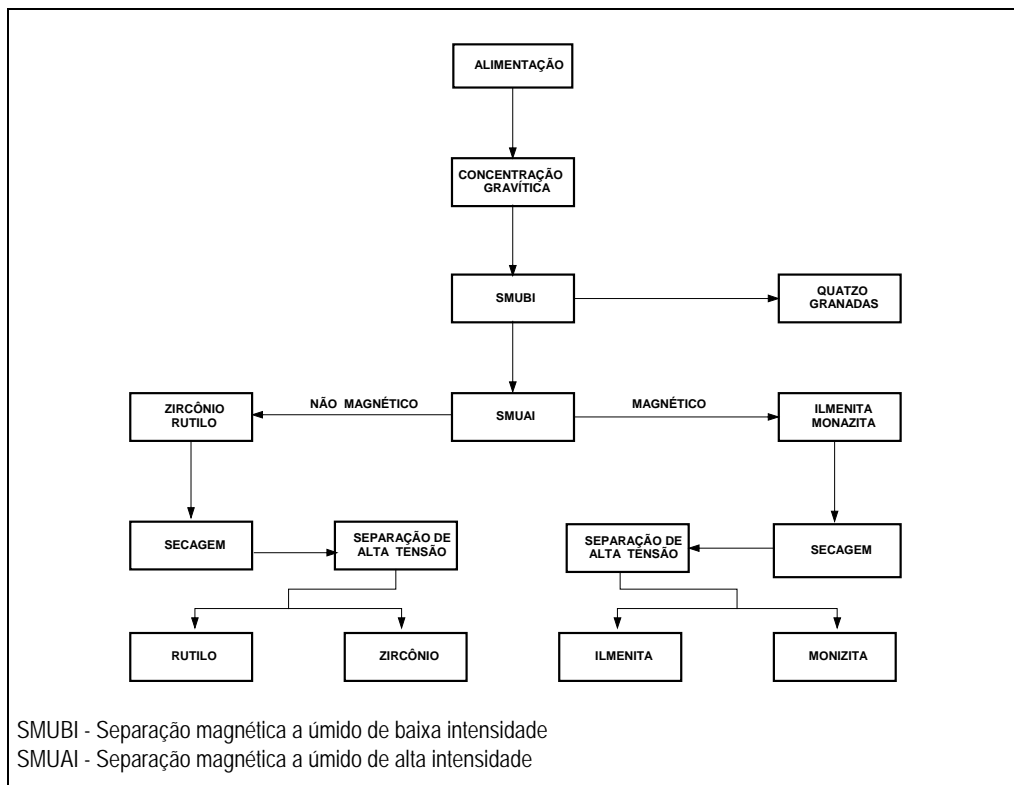


Figura 11 – Diagrama de blocos simplificado, típico para o processamento de areia monazítica⁽⁷⁾.

AVANÇOS NA SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA

Na área de separação eletrostática, observa-se algum esforço de pesquisa no sentido de desenvolver separadores para partículas finas. Na concepção desse separador, tem-se uma superfície móvel sobre a qual o fluxo de material fino é distribuído, formando uma camada espessa por meio de um alimentador vibratório. Nesse equipamento, a separação ocorre por um processo de remoção contínua das partículas carregadas com polaridade oposta à do eletrodo. É aplicada uma vibração adequada na superfície carreadora sob a ação de um campo eletrostático, enquanto as partículas condutoras são suspensas e removidas. A concepção desse separador atingiu a etapa protótipo e os seus idealizadores o recomendam para a separação de partículas sólidas finas, provenientes de misturas heterogêneas, apropriando-se das diferentes propriedades elétricas induzidas ou naturais⁽²²⁾.

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, está sendo proposto por Mesenyashin⁽²⁴⁾. Esse novo 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 é utilizado na separação eletrostática. A ativação de substâncias minerais contendo feldspato e quartzo tem permitido a obtenção de concentrados com 82% de feldspato, com base em uma alimentação com 32%⁽²⁴⁾ de feldspato.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) SVOBODA, J; FUJITA, T. Innovation in magnetic techniques of material treatment: technology at a crossroad. Proceeding of the 22th International Mineral Processing Congress (IMPC), p. 261-269, Cape Town, South Africa, 2003.
- 2) NORRGRAN, D. A. Advances in mineral separation of fine high-purity products. Ceramic bulletin, vol. 69, 1990.
- 3) LAWVER, J. E; HOPSTOCK, D. M. Wet magnetic separation of fine weakly magnetic minerals. Minerals Science Engineering. vol.6, n^o 3, p. 154-172, Jul. 1974.
- 4) MIHALK, P. Magnetic separation theory equipment and application. Word Mining, p. 105-106, set. 1979.
- 5) 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.
- 6) LAWVER, E. J.; HOPSTOK, D. M. Eletrostatic and magnetic separation. In: WEISS. N. L. (ed) SME mineral processing handbook. Society of Mining Engineers, p. 6.1-6.48, 1985.
- 7) JAIN, S. K. Ore processing. A. A. Balkema: Indian Edition Series 15. 518p. p. 338-364, 1987.
- 8) WILLS, B. A. Mineral processing technology. New York: Pergaman Press. 525p. p. 389-421, 1980.
- 9) KELLEY, E. G.; SPOTTISWOOD, D. J. Introduction to mineral processing. New York: John Wiley and Sons. 491p. p. 274-300, 1982.
- 10) BRONCALA, W. J. Magnetic separation. In: MULAR A. L.; BHAPPU, R. B. (ed). Mineral processing plant desing. (s.d.): Society of Mining Engineers, 946p. p. 467-478, 1980.
- 11) LUZ, A. B. e ALMEIDA, S.L.M. Manual de Usinas de Beneficiamento, Rio de Janeiro/CETEM/CNPq/DNPM/FINEP, 1989, 88p.
- 12) SAMPAIO, J.A.; LUZ, A.B. e LINS, F.F. Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil, 16 e 17p, CETEM/MCT, 2001, 398p.
- 13) MURRAY, H. H. Magnetic as a separation techniqe. In: SOMASUNDARAM, P. (ed). Advances in mineral processing. Settleton: Society of Mining Engineers, 756p. p. 335-544, 1986.

- 14) WASMUTH, H. D. ; UNKELBAC, K. H. Recent developments in magnetic separation of feebly magnetic minerals. *Minerals Engineering*, Oxford, vol. 8, n° 7-11. p. 825-837. Feb. 1991.
- 15) SVOBODA, J. Magnetic methods for the treatment of minerals. In: FUERSTENAU, D, W. (ed.) *Developments in mineral processing*. Amsterdam:Elsevier, 692p. p. 1-235, 1978.
- 16) ARVIDSON, B. R.; BARNEA, E. Recent advances in dry high-intensity permanent-magnet. *International Mineral Processing Congress*, 14, Toronto 1982, Proceedings.
- 17) MATHIEU, G. I. and SEROIS, L. L. Advances in technology of magnetic separation. *XIV International Mineral Processing*. Amsterdam: Elsevier Science Publishing Company Inc. 2v. vol. 1. p. 937-950, 1988.
- 18) 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*. 1988 Amsterdam: Elsevier Science Publishing Company Inc. 2v. vol.1. p. 905-915.
- 19) BLAZY, P. *La valorisation des minerais*. Paris. Presses Universitaires de France. 416p. p. 166-175, 1970.
- 20) TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA In Memoriam Professor Paulo Abbi Andery. Fundação Instituto Tecnológico de Pernambuco. 399p. p. 188-204, 1980.
- 21) INCULET, I. I. *Electrostatic mineral separation*. New York: Research Studies Press Ltd. 1984. 153p.
- 22) DYRENFORTH, W. P. Electrostatic separation. In: MULAR, A, L. and BHAPPU. R. B. (ed). *Mineral processing plant design*. Society of Mining Engineers. 946p. p. 479-489, 1980.
- 23) R. CICCUI; M. GHIANI; R. PERETI; A. SERCI; A. ZUCCA. A New electrostatic separator for fine particles. In: *XXI International Mineral Processing Congress*, Rome, Italy, July, 23-27, A7.42p. – A7.50p, 2000.
- 24) MESENYASHIN, A.I. Novel tubular electrostatic Separators. In: *XXI International Mineral Processing Congress*, Rome, Italy, July 23-27, A7.89p.-A7.94p, 2000.
- 25) DORFNER, S.; TRONDLE, H.; JAKOBS, U. Electrostatic Feldspar/Quartz Separation without hydrofluoric acid reduces pollution. In: *XXI International Mineral Processing Congress*, Rome, Italy, July 23-27, C7.30p.-C733p, 2000.

ANEXO

Tabela 2 – 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: Catálogada: Catálogo Eriez Magnetics.

Tabela 3 – Atratividade Relativa de Minerais.

MINERAL	ORIGEM DA AMOSTRA	RA*	MINERAL	ORIGEM DA AMOSTRA	RA*
Grupo 1 – Ferromagnéticos (aproximadamente requerem 500 a 5000 gauss para separação)					
Ferro		100.00	Magnetita	Port Henry, N.Y.	14.862
Magnetita	Desconhecido	48.000	Franklinita	Franklin Furnace, N.J.	13.089
Grupo 2 – Moderadamente magnéticos (aproximadamente 5000 a 10000 gauss para separação)					
Ilmenita	Edge Hill, Pa.	9.139	Franklinita	Franklin Furnace, N.J.	1.480
Pirrotita	Sudbury, Ontario	2.490			
Grupo 3 – Fracamente magnéticos (aproximadamente 10000 – 18000 gauss por separação)					
Hematita	Lake Superior District	0.769	Bornita	New South Wales, Australia	0.086
Siderita	Roxbury, Conn.	0.743	Apatita	Eganville, Ontario	0.083
Rodonita	Franklin Furnace, N.J	0.560	Tetrahedrita	Peru	0.080
Limonita	Nova Escocia	0.314	Willemita	Franklin Furnace, N.J.	0.076
Braunita	Itália	0.300	Bornita	Union Bridge, Maryland	0.067
Corindon	Gaston County, N.C.	0.264	Esfarelita	Lowa	0.057
Hematita	Inglaterra	0.257	Cerussita	Austrália	0.057
Pirolusita	Bartow County, Ga.	0.248	Dolomita	Sing Sing, N.Y	0.057
Manganita	Nova Escocia	0.194	Psilomelana	North Mt.Mine, Arkansas	0.056
Calamina	Friedensville, Pa.	0.187	Arsenopirita	Action, York Co., Maine	0.054
Esfarelita	Frieburg, Alemanha	0.182	Sphene (Titanite)	Murchison Township, ontario	0.054
Siderita	Desconhecido	0.160	Calcoprita	Austrália	0.051
Rodocrosita	Argentina	0.152	Molibdenita	New South Wales, Australia	0.048
Granada	Desconhecido	0.149	Talco	Swain Co., N.C	0.042
Serpentinita	Desconhecido	0.140	Celestita	Strontium Island	0.038
Molibdenita	Frankford, Pa.	0.118	Calcocita	Butte, Montana	0.038
Mica	Bengal, India	0.115	Cinábrio	New Almaden, California	0.038
Corindon	Lehigh Co., Pa.	0.111	Gesso	Derbyshire, England	0.038
Cerargyrita	Novo México-USA	0.105	Zinco	Franklin Furnace, N.J.	0.038
Huebnerita	Henderson, N.C.	0.105	Ortoclásio	Elam, Pa.	0.035
Wolframita	Chochiwon, Kenya	0.105	Epidoto	Desconhecido	0.033
Wolframita	Clima, Colorado	0.100	Hornblenda	Desconhecido	0.025
Grupo 4 – Debilmente magnéticos (acima de 18000 gauss para separação)					
Pirita	Rio Tinto, Espanha	0.022	Chisocola	Miami, Arizona	0.0063
Smithsonita	Kelly, N.M.	0.022	Rutilo	Desconhecido	0.0034
Esfalerita	Joplin, Mo.	0.022	Mica, rubi	Bengal, India	0.0032
Estibinita	Alemanha	0.022	Ortoclásio	Alexandria, N.Y.	0.0032
Criolita	Greenland	0.019	Calcário	Desconhecido	0.0024
Enargita	Butte, Montana	0.019	Cobalita	Desconhecido	0.0023
Senarmonita	Desconhecido	0.019	Safira	Desconhecido	0.0023
Magnesita	Lancaster Country, Texas	0.019	Pirita	Desconhecido	0.002
Azurita	Chessy, França	0.018	Cassiterita	Cornwall, Inglaterra	0.0019
Gipsita	Grand Rapids, Michigan	0.016	Turmalina	Desconhecido	0.0012
Malaquita	Katanga, Africa	0.016	Dolomita	Desconhecido	0.0011

Tabela 3 – Atratividade Relativa de Minerais (Continuação).

MINERAL	ORIGEM DA AMOSTRA	RA*	MINERAL	ORIGEM DA AMOSTRA	RA*
Grupo 4 – Debilmente magnéticos (acima de 18000 gauss para separação)					
Nicolita	Bebra Hesse, Alemanha	0.016	Spinélio	Desconhecido	0.0010
Serpentinita, vermelha	Desconhecido	0.016	Berilo	Desconhecido	0.0008
Stibnita	Juab County, Utah	0.013	Rubi	Desconhecido	0.0008
Dioptaso	Desconhecido	0.012	Covelita	Butte, Montana	0.0007
Turmalina	Desconhecido	0.0012	Feldspato	Desconhecido	0.0006
Cuprita	Cornwall, Inglaterra	0.0096	Esfalerita	Jefferson City, Tenn.	0.0005
Galena	Galena, Ill	0.0096	Zircão	Desconhecido	0.0002
Grupo 5 – Não magnéticos e Diamagnéticos					
Barita	Bartow County, Ga.	0.0	Corindon	Desconhecido	- 0.0006
Adularia	Desconhecido	- 0.0004	Topazio	Desconhecido	- 0.0006
Calcita	Desconhecido	- 0.0004	Galena	Desconhecido	- 0.0011
Fluorita	Desconhecido	- 0.0004	Antimonio, nativo	Desconhecido	- 0.0023
Sphalerita	Desconhecido	- 0.0004	Apatita	Desconhecido	- 0.0034
Celestita	Desconhecido	- 0.0005	Argonita	Desconhecido	- 0.0048
Quartzo	Desconhecido	- 0.0005	Grafita	Ceylon	- 0.032
(*)Nota:	A atratividade relativa variará segundo a origem da amostra As atratividade foram calculadas usando o volume de susceptibilidade de 250.000×10^{-8} como igual a 100				

Fonte Catálogada: Eriez Magnetic.