

## CAPÍTULO 18 – ENSAIOS DE SEPARAÇÃO MAGNÉTICA E ELETROSTÁTICA

### **João Alves Sampaio**

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

### **Silvia Cristina Alves França**

Engenheira Química/UFS, Mestre e Doutora em  
Engenharia Química/COPPE-UFRJ  
Tecnologista III do CETEM/MCT

### **Adão Benvindo da Luz**

Engenheiro de Minas/UFPE, Mestre e Doutor em  
Engenharia Minera/EPUSP  
Pesquisador Titular do CETEM/MCT



## 1. INTRODUÇÃO

Os estudos sobre separação magnética e eletrostática datam de pelo menos 600 anos a.C. e chegaram ao conhecimento da humanidade por meio da divulgação dos estudos e experimentos do filósofo grego, Thales de Mileto, conhecedor de algumas propriedades magnéticas dos minerais. Ainda o mesmo filósofo descobriu, ao esfregar âmbar em pele de animal, que a carga eletrostática produzida por esta atrição poderia atrair fracamente partículas minerais não condutoras (Venkatraman *et al.*,2006).

A aplicação da separação magnética ao processamento mineral depende da susceptibilidade magnética dos minerais a serem processados, enquanto o método eletrostático de beneficiamento de minérios considera a condutividade elétrica dos minerais, como a propriedade básica de separação (Sampaio e Luz, 2004).

O uso da separação magnética no beneficiamento de minérios consiste, não só na remoção dos minerais de ferro considerados contaminantes, como também na concentração de minérios, como exemplo, na concentração de hematita contida em itabirito.

Os avanços obtidos na ciência dos materiais e na tecnologia de fabricação dos novos equipamentos de separação magnética permitiram o desenvolvimento de campos magnéticos de elevadas intensidades, inclusive gradientes de campos mais elevados. Esses avanços permitiram o uso mais diversificado da separação magnética na área de tratamento de minérios. Desta feita, surgiram novos mercados com o emprego dos separadores de ímãs permanentes de terras-raras e os separadores com a tecnologia dos supercondutores.

No entanto, a separação eletrostática ainda é o processo indicado no beneficiamento de minérios, como: areia monazítica, minerais pesados, ilmenita, rutilo, zircônio, além de granada, dentre outros. Ademais, o controle ambiental, cada vez mais exigente, proporciona o emprego desse processo na separação de metais e plásticos, na reciclagem de materiais.

O uso da separação magnética e eletrostática na área mineral aconteceu por meio do desenvolvimento de processos e equipamentos, com o

conseqüente surgimento de patentes. Em 1792, o inglês, William Fularton, descreveu a concentração de minério de ferro, por meio de separação magnética. Em 1886, o americano, F. Carpenter, obteve a patente americana para a concentração eletrostática de minérios (Venkatraman *et al.*, 2006).

## 2. SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

A separação magnética pode ser classificada em quatro categorias, dependendo do meio utilizado e da intensidade de campo. Assim, tem-se a separação magnética, a seco, de baixa e alta intensidade e, a úmido, de alta e baixa intensidade.

A aplicação desse método de separação no processamento mineral estende-se desde a remoção de sucatas metálicas, aos separadores criogênicos ou supercondutores. O atual desenvolvimento da ciência dos materiais e da tecnologia do magnetismo permitem a fabricação de separadores com gradientes e campos muito mais elevados que os convencionais. Desse modo, surgiram os separadores, com campos da ordem de 6 T (60.000 G), que empregam a tecnologia dos supercondutores. Nesta linha incluem-se também os separadores com ímãs permanentes, fabricados com base em elementos de terras-raras. Registra-se aí um marco significativo nos avanços técnicos e científicos relacionados à separação magnética aplicada à área de beneficiamento de minérios.

A atração magnética de um mineral, quando submetido a um campo magnético, varia com a sua composição química, isto é, com o seu índice de impurezas, as quais dependem da sua forma de ocorrência nos jazimentos minerais.

A propriedade de um material que determina a sua resposta a um campo magnético é a **susceptibilidade magnética**. Com base nessa propriedade, os minerais ou materiais são classificados em duas categorias: aqueles que são atraídos pelo campo magnético e os que são repelidos por esse campo. Os detalhes sobre cada tipo de material são discutidos a seguir.

- (i) Minerais **ferromagnéticos** compreendem aqueles que são fortemente atraídos pelo ímã comum. O exemplo mais conhecido é a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).
- (ii) Os minerais **paramagnéticos** são fracamente atraídos pelo ímã comum e o exemplo clássico é a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Esses minerais possuem permeabilidade magnética mais elevada que a do meio circundante, usualmente, água ou ar. Além disso, concentram um elevado número de linhas de indução provenientes do campo externo.
- (iii) Finalmente, os minerais **diamagnéticos** possuem susceptibilidade magnética negativa e, portanto, são repelidos quando submetidos a um campo magnético. Nesse caso, além do quartzo, destacam-se: a cerussita, magnesita, calcita, barita, fluorita, esfalerita, dentre outros. Esses minerais possuem permeabilidade magnética mais baixa que a do meio circundante (usualmente água ou ar). Esse efeito diamagnético é geralmente menor que o correspondente efeito de atração dos minerais paramagnéticos.

Quando se descreve um campo magnético é comum referir-se a duas grandezas: a densidade de fluxo magnético ( $B$ ) e a intensidade de campo ( $H$ ) ambas são medidas em Tesla (T), como definidas a seguir:

- (i)  $\vec{B}$  refere-se ao número de linhas de indução que passam através da partícula do mineral;
- (ii)  $\vec{H}$  é a força de magnetização que induz a passagem das linhas de indução através da partícula.

Tais grandezas são vetoriais e, portanto, possuem módulo, direção e estão relacionadas na Equação [1]:

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

onde:

$\mu$  é a permeabilidade magnética do meio.

→ No vácuo,  $\mu$  pode ser igual a  $\mu_0$  e, nestas condições, as grandezas  $\vec{B}$  e  $\vec{H}$  diferem, somente, pelo fator de proporcionalidade ( $\mu$ ). Assim, elas podem ser chamadas, indistintamente, de campo magnético.

Na prática, ao se colocar 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  $\Psi$ , tal que:

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

onde:

$\Psi$  indução magnética do material.

O seu valor no ar é muito pequeno e, dessa forma, pode-se igualar os valores das grandezas  $\vec{B}$  e  $\vec{H}$ .

Na prática, é muito comum referir-se apenas a 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 dada por:

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

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

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

A taxa 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 o 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 dependendo do campo de magnetização, da natureza e manuseio da amostra.

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

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

Das Equações [1], [2], [3] e [4] conclui-se que:

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

Esta equação descreve a relação entre a permeabilidade e a susceptibilidade magnética, para o caso de minerais.

### 3. SEPARAÇÃO MAGNÉTICA A SECO

Os equipamentos mais utilizados na separação a seco são os separadores de ímãs permanentes, de correias cruzadas, de rolos induzidos e de discos. Neste Capítulo serão discutidos apenas os três primeiros tipos de equipamentos.

#### Separadores de Ímãs Permanentes

A história da separação magnética está ligada, de alguma forma, aos ímãs permanentes, usados para remover os minerais ferromagnéticos. Com o desenvolvimento dos eletroímãs, capazes de produzir campos magnéticos acima de 1 T, o interesse pelos ímãs permanentes aplicados ao beneficiamento de minério diminuiu de forma significativa. Associado a este fato registra-se, ainda, a escassez de minerais ferromagnéticos e a necessidade de equipamentos com capacidades mais elevadas. Há mais de uma década existe, no mercado, equipamentos construídos com ímãs permanentes, capazes de produzir campos com intensidade acima de 1 T, isto é, o surgimento dos ímãs de terras-raras.

Esses equipamentos com ímãs de terras-raras possuem vantagens significativas em relação aos modelos convencionais com eletroímãs, dentre elas destacam-se:

- (i) não há necessidade de corrente elétrica e nem dos dispositivos para resfriamento de bobinas;
- (ii) os campos magnéticos obtidos por meio desses equipamentos são estáveis e situam-se na faixa acima de 1 T;
- (iii) os equipamentos são compactos e de fácil operação;

- (iv) o consumo de energia é excessivamente baixo, comparado ao dos equipamentos com eletroímãs.

Por seu turno, o ímã permanente possui desvantagens, como a pouca flexibilidade para variar a intensidade de campo, além de esta ser sensível à variação da temperatura. A razão de variação é da ordem de  $10^{-4}$  por grau centígrado.

Na Figura 1 consta um separador de ímã permanente usado em laboratório, fabricado pela INBRAS-ERIEZ, modelo RE-ROLL, cujos rolos consistem de anéis de ímã de terras-raras Erium-3000. Este é um separador de correia com 0,7 mm de espessura, 16 cm de largura, 30 cm de comprimento. O equipamento, com diâmetro do rolo igual a 8 cm, é indicado para operação a seco em laboratório. Possui intensidade de campo variável, cujo valor máximo (1,2 T) ocorre na situação em que o ímã está em contato com o pólo. Entretanto, o valor menor (0,5 T) ocorre no centro do ímã. A capacidade do separador depende da natureza do minério e da sua granulometria. O valor máximo da sua capacidade é da ordem de 250 kg/h.

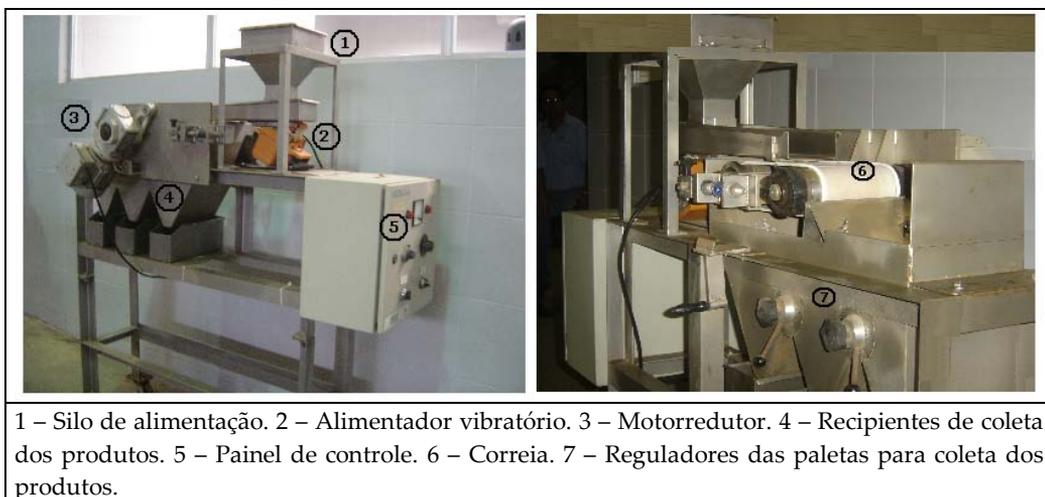


Figura 1 – Separador magnético de ímãs de terras-raras existente no CETEM.

A espessura das correias desses separadores varia com a granulometria e abrasividade do minério. Portanto, os equipamentos podem operar com correias de 0,25 mm de espessura, na maioria das aplicações dos processos industriais. Para minérios muito finos, podem ser utilizadas correias com até 0,12 mm. No caso dos minérios mais grossos e mais abrasivos, podem ser utilizadas correias com espessuras de até 1,0 mm.

A espessura ideal da correia, para um determinado processo, é objeto de estudo em laboratório, para definir:

- (i) a melhor espessura e vida útil da correia;
- (ii) maior eficiência do processo de separação.

### **Alimentação e Desempenho do Separador**

O separador vibratório proporciona uma alimentação de modo a formar uma camada uniforme e bem distribuída de minério sobre a correia. Este procedimento favorece a eficiência da separação, a qual está ligada a vários fatores, dos quais, destacam-se:

- (i) a espessura da camada de minério, que é objeto de investigação durante a realização dos ensaios de laboratório;
- (ii) a granulometria e densidade do minério processado;
- (iii) o controle da velocidade de rotação do rotor, que mede a velocidade da correia, situada na faixa de 120 a 180 rpm.

O operador deve controlar e ficar atento a todos esses fatores, com a finalidade de otimizar o processo de separação.

A exemplo dos outros separadores, os de ímãs de terras-raras está configurado para operar em estágios de limpezas. Nesta configuração, a intensidade de campo varia, de estágio a estágio, na ordem crescente, desde o primeiro até o último estágio. Os equipamentos industriais são montados em módulos, arranjos de três ou mais módulos, formando um conjunto em cascata. Nas investigações em laboratório, o operador pode simular os estágios, retornando o concentrado magnético, se for o caso, com a devida variação na intensidade de campo, ou seja, na ordem crescente, desde o primeiro estágio, até o último.

Alguns dos procedimentos, materiais e equipamentos que o operador deve utilizar nos ensaios de laboratório estão discriminados no Quadro 1. O operador pode, ainda, adicionar outros procedimentos, materiais e equipamentos não listados aqui.

Quadro 1 – Procedimentos, materiais e equipamentos utilizados em testes no separador de ímãs de terras-raras.

ITEM	DISCRIMINAÇÃO
1	Proceder à limpeza de toda a área de trabalho, inclusive dos equipamentos a serem utilizados nos testes. Ao final de cada teste, deixá-los todos limpos e em perfeitas condições operacionais.
2	Verificar a disponibilidade da quantidade, da granulometria e da umidade da amostra, para o caso de testes com amostras secas.
3	Preparar a amostra para o teste. No caso de amostra seca, procede-se à secagem total, desagregação total e quarteamento da mesma em frações adequadas a cada teste.
4	Conferir se todos os equipamentos a serem utilizados estão em bom estado de conservação, inclusive aqueles com partes móveis, verificando se elas estão devidamente lubrificadas.
5	Verificar se a correia está limpa, não danificada e esticada o suficiente para o ensaio. O operador deve conferir se o esticador da correia está em condições de uso.
6	Confirmar o estado de funcionamento do alimentador vibratório. O operador deve ficar atento para a distribuição ajustável do material sobre a correia, o qual deve estar distribuído de forma homogênea sobre a correia. O alimentador responde também pela eficiência da separação.
7	Providenciar um cronômetro para medida dos intervalos de tempo de operação, amostragens e outros.
8	Disponibilizar recipientes devidamente limpos e adequados à coleta de amostras e outros.
9	Averiguar se todos os dispositivos de controle do equipamento estão funcionando adequadamente.
10	Verificar a posição das calhas coletoras para direcionar as frações magnéticas aos seus próprios recipientes, ou seja, separadamente.

### **Separadores de Correias Cruzadas**

O separador, conforme ilustrado no desenho esquemático da Figura 2, consiste de um transportador de correia plana (correia principal), que passa

entre os pólos paralelos de dois eletroímãs, e outro transportador de correia plana, perpendicular à principal (correia secundária). A correia secundária passa sobre a superfície do pólo superior com a área menor em relação a do pólo inferior, proporcionando a convergência do campo. Entre as duas superfícies existe também um vão livre, 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 T, possui um índice elevado de seletividade, e sua faixa granulométrica de aplicação está compreendida entre 1,65 mm e 104  $\mu\text{m}$ .

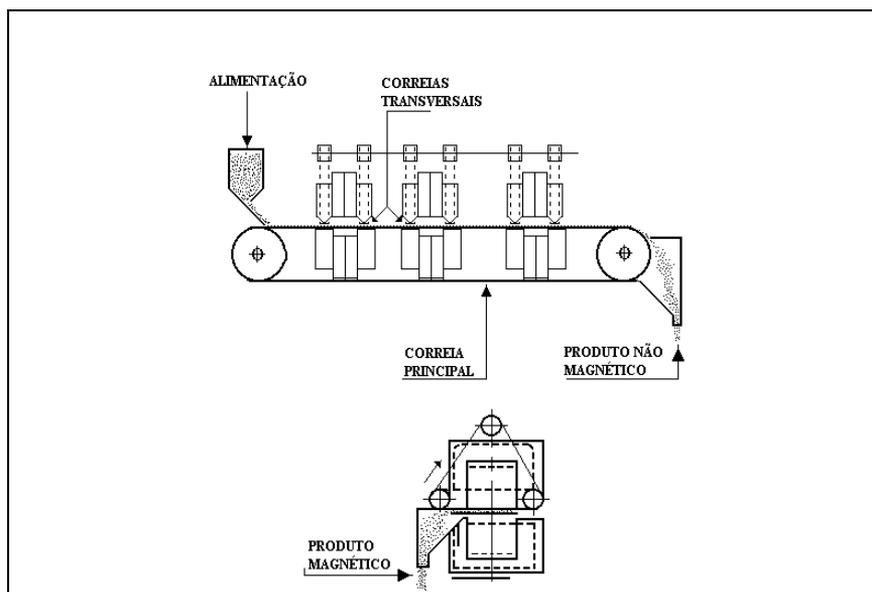


Figura 2 – Diagrama esquemático de um separador magnético de correias cruzadas de três estágios.

Os estágios são operados independentemente, com exceção da correia principal. Dessa forma, a abertura do vão livre e a velocidade da correia secundária são independentes.

Os equipamentos são disponibilizados em vários modelos, desde os simples, apenas com um estágio, até os equipamentos com estágios múltiplos, ou seja, que permitem vários estágios de separação em um mesmo equipamento (Figura 2).

A alimentação é feita sobre a correia principal de modo a formar, preferencialmente, uma monocamada sobre a mesma. A taxa de alimentação (kg/h) é uma variável importante do processo, associada à velocidade da correia. Ambas respondem pela seletividade do processo e devem ser otimizadas durante os estudos em laboratório e/ou escala piloto. Em geral, a rotação do rotor, que imprime a velocidade da correia, não deve ser superior a 150 rpm, faixa operacional que resulta em baixos valores para a recuperação.

O tamanho das partículas afeta a eficiência da separação. As partículas finas são desviadas do seu percurso normal por vibrações do equipamento e forças eletrostáticas, o que ocasiona perdas na recuperação mássica do processo. Esse fato ocorre com mais frequência nas operações com minérios, nas quais predomina a faixa granulométrica abaixo de 75  $\mu\text{m}$ . Nesses casos, aconselha-se operar o equipamento com baixa velocidade do rotor.

Na prática, a abertura do vão livre determina a distância entre as correias que, em geral, deve ser 2,5 vezes maior que o tamanho da maior partícula.

A distância entre correias depende, entre outros fatores, da granulometria da alimentação e das características magnéticas do minério. Os separadores industriais operam na faixa granulométrica de 4 mm a 75  $\mu\text{m}$ . Não são recomendadas operações com faixas granulométricas muito amplas.

O separador de correias cruzadas favorece a obtenção de vários produtos com aumento do campo magnético. Desta feita, o primeiro estágio gera um produto de minerais com maior susceptibilidade magnética, seguido de um gradiente decrescente, para os estágios seguintes.

### **Separadores de Rolos Induzidos**

Os separadores de rolos induzidos são fabricados desde o modelo mais simples com um rotor, modelo preferido para uso em laboratórios, até os mais sofisticados com múltiplos rotores em série. A capacidade de alimentação varia caso a caso e é expressa em kg/h.m de largura do rotor, que, nas operações industriais, situa-se entre 2.000 a 3.000 kg/h.m.

Esses separadores são utilizados na remoção de impurezas contidas em concentrados do processamento mineral ou mesmo de outros produtos, como por exemplo, aquelas obtidas por processos químicos. Tais impurezas podem ser paramagnéticas ou magnéticas e, em geral, são removidas nos processos de purificação de concentrados de quartzo, feldspato, caulim, calcita, talco, entre outros. Os separadores podem prover um campo de até 2 T e gradiente elevado, quando o fluxo de linhas de indução converge na região compreendida entre os rolos e os pólos de indução. A Figura 3 ilustra um separador magnético de rolos induzidos, com seus componentes.

A seletividade do processo é obtida por meio dos ajustes da velocidade do rotor e do fluxo magnético na região de separação, além do posicionamento dos defletores de fluxo.

O fluxo de partículas, alimentado no topo do separador, deve ser bem centralizado por meio de um alimentador vibratório. As partículas passam pelo vão livre (*gap*), distância entre o eletroímã e o pólo, e são desviadas da sua rota normal pela ação do campo magnético. Obtém-se então uma fração magnética e outra não magnética. As partículas magnéticas são atraídas pelo rotor e coletadas como primeiro produto magnético. A fração não atraída pelo primeiro rotor segue para o segundo rotor do separador e assim sucessivamente para o rotor seguinte com maior intensidade de campo (Figura 3).

O vão livre entre os pólos e os rotores é ajustável, assim como os divisores de fluxos, os quais constituem mecanismos importantes na eficiência da separação. Valores típicos para a indução magnética sobre a superfície do rotor, em função do vão livre, são dados na Tabela 1.

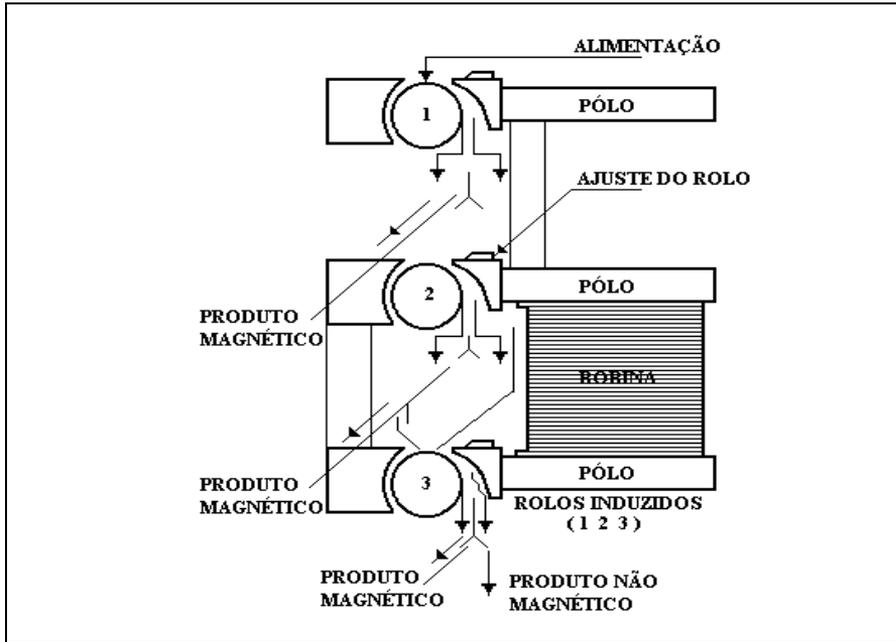
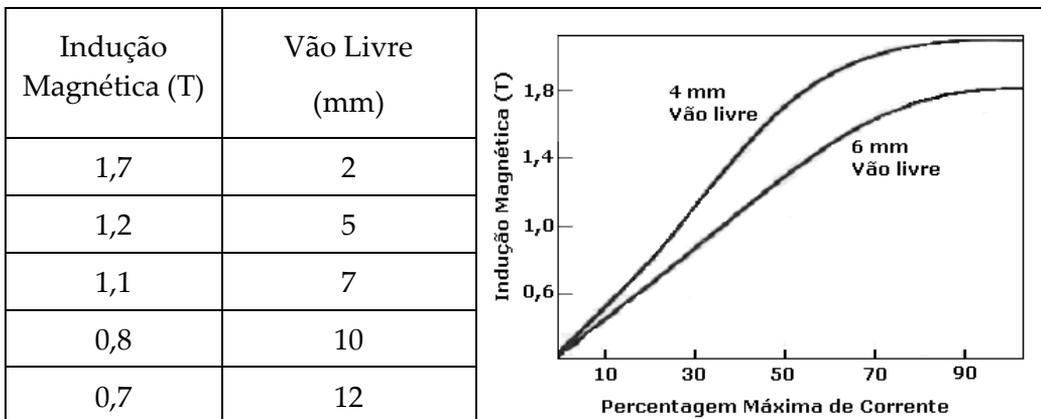


Figura 3 – Diagrama ilustrativo de um separador de rolos induzidos com três estágios de separação.

Tabela 1 – Relação entre a indução magnética, tamanho do vão livre e percentagem máxima de corrente.



É prática usual assegurar que cada rotor ou estágio da separação possua maior intensidade de campo magnético que o anterior. Isso pode ser feito por meio do ajuste adequado dos pólos, bem como pelo controle da corrente elétrica em cada bobina, a fim de que o menor vão livre (distância entre o pólo

e rotor) seja obtido de forma sucessiva para todos os estágios. Assim, o operador deve ajustá-lo, de tal forma que os valores maiores e menores correspondam, respectivamente, ao primeiro e último estágios da separação.

Em decorrência da distribuição granulométrica do minério na alimentação, torna-se difícil expressar a capacidade do equipamento em termos de massa (kg/h). O minério deve estar seco, liberado e a faixa granulométrica entre 2,0 mm e 100  $\mu\text{m}$ , na qual se obtêm os melhores valores na eficiência da separação. Desse modo, recomenda-se o ajuste do vão livre em cerca de 1,5 vezes o tamanho médio das partículas.

A baixa capacidade por unidade e a estreita faixa granulométrica são as duas limitações técnicas para aplicações dos separadores de rolos induzidos. Tais limitações estão relacionadas à baixa flexibilidade de ajuste do vão livre para atender à necessidade da separação de um determinado fluxo de partículas. Entretanto, a abertura do vão livre deve ser suficiente para evitar a obstrução do mesmo pelas partículas maiores. Tal abertura reduz a indução magnética ou campo magnético e, portanto, limita a espessura da camada de partículas sobre o rotor. Finalmente, diminui, de forma significativa, a taxa de alimentação.

#### **4. SEPARAÇÃO MAGNÉTICA A ÚMIDO**

Emprega-se o processo a úmido em separadores de alta e baixa intensidades de campo, fabricados com ímãs permanentes ou eletroímãs. Aqueles fabricados com ímãs permanentes destacam-se na preferência dos usuários, em decorrência do menor custo de manutenção e/ou operação e são empregados na concentração de minerais ferromagnéticos. Os equipamentos com elevadas intensidades de campo são aplicados na separação de minerais paramagnéticos. Os dois tipos de separadores diferem, também, na forma de produção do campo e, principalmente, nas suas capacidades. Os equipamentos de baixa intensidade, em geral, possuem capacidades menores.

##### **Separador de Tambor de Baixa Intensidade**

Esses separadores são utilizados na separação de minerais ferromagnéticos, desde que as intensidades de campo desses equipamentos atinjam valores de até 0,2 T.

A operação consiste em introduzir a polpa de minério no tambor rotativo, por meio de um alimentador. As partículas magnéticas aderem ao tambor rotativo, no qual se encontra instalado o ímã, que pode ser permanente ou eletroímã. As partículas magnéticas são descartadas do circuito como produto magnético. As fotos da Figura 4 ilustram melhor a operação do equipamento.

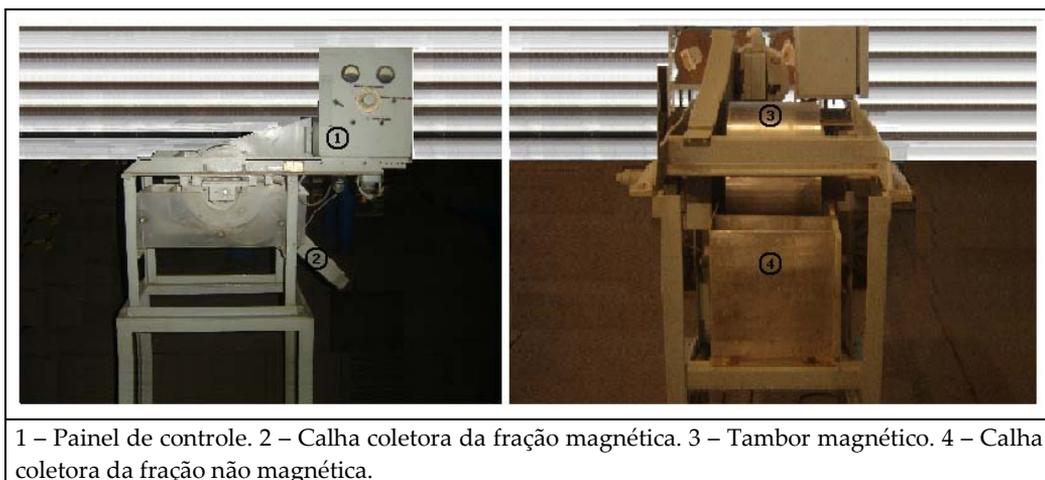


Figura 4 – Separador magnético de tambor de baixa intensidade existente no CETEM.

### Separador Magnético a Úmido de Alta Intensidade para Laboratório

O uso da separação magnética, a úmido, de alta intensidade, eliminou a etapa de secagem da amostra, obrigatória no método de separação a seco, e ampliou a faixa granulométrica de aplicação da técnica para minérios com granulometria abaixo de 75  $\mu\text{m}$ . Os estudos para aplicação deste método de separação podem ser feitos em laboratório, e em escala piloto. No último caso, os ensaios contínuos são conduzidos em um separador tipo Jones. Neste Capítulo são discutidos os ensaios com o separador tipo Jones, para laboratório.

O campo magnético do separador é produzido por eletroímãs, entre os quais situam-se as matrizes ferromagnéticas. Estas possuem, entre outras, a função de promover um elevado campo magnético por onde passa o minério,

cujas partículas paramagnéticas são capturadas nas próprias matrizes, por ação do campo magnético.

As matrizes são construída, em metal, com baixa magnetização e em várias formas. Para minério muito fino, como o caulim, utiliza-se lã de aço como matriz, cujas operações, em laboratório, proporcionam excelentes resultados. Devido ao sistema de matrizes e à grande eficiência da separação nas faixas granulométricas finas, o equipamento inclui vantagens significativas comparadas aos demais. A sua aplicação, devido à operação com alta intensidade, restringe-se, em geral, aos minerais paramagnéticos.

Quando se trata de minerais ferromagnéticos, o método encontra limitações. A remoção das partículas magnéticas captadas na matriz é dificultada em virtude da alta susceptibilidade magnética dos minerais, mesmo utilizando pressões de 40 a 50 psi, na água de lavagem (Sampaio e Luz, 2004).

Os separadores de laboratório tratam pequenas quantidades de material, em decorrência do tamanho da matriz. Contudo, são equipamentos práticos e versáteis, que proporcionam resultados qualitativos confiáveis a baixo custo. Tais resultados podem ser confirmados nos separadores contínuos em escala piloto. Assim, são obtidos os parâmetros e/ou variáveis necessários ao dimensionamento dos equipamentos industriais (Figura 5).



Figura 5 – Separador magnético a úmido de alta intensidade para uso em laboratório (CETEM/MCT).

Na Figura 6 consta o desenho esquemático de 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 com várias extremidades ou pontas, favorecendo a existência de um elevado gradiente de campo, entre as mesmas.

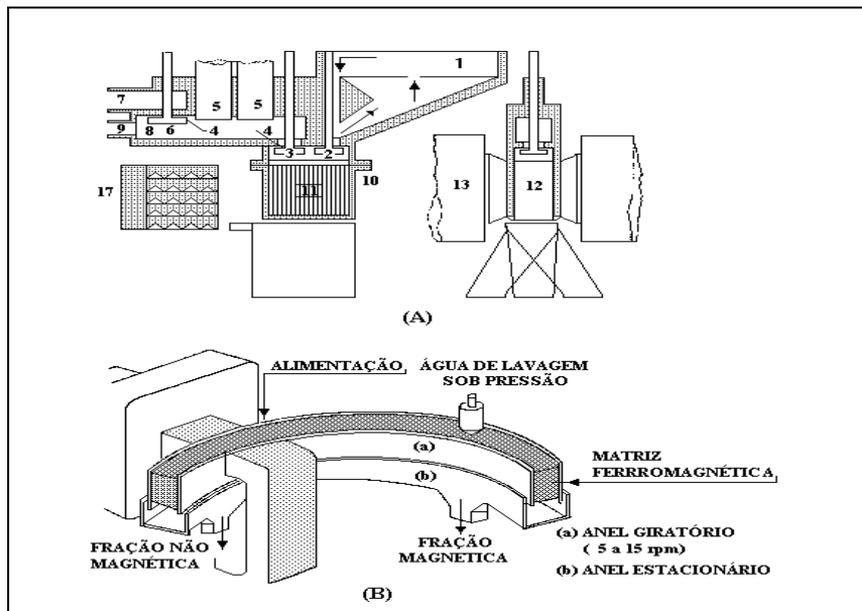


Figura 6 – Diagrama esquemático dos separadores a úmido de alta intensidade para laboratório (A) e de carrossel (B) para circuito contínuo.

A primeira etapa da operação consiste em escolher a matriz, ligar o equipamento e adicionar a amostra no tanque de alimentação (1). Em seguida, abre-se a válvula (2) com a polpa em agitação e, por gravidade, alimenta-se o separador exatamente na matriz ferromagnética (MF) até esvaziar o tanque de alimentação. A quantidade de amostra, não superior a 200 g, e a percentagem de sólidos na polpa são variáveis. Cabe ao operador otimizar o processo durante os ensaios.

Na segunda etapa da operação, as partículas capturadas 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 e otimizar o tempo e a pressão da água de lavagem, que são variáveis importantes no processo e estão ligadas a outros fatores, como a susceptibilidade magnética dos minerais. Nessa operação de lavagem coleta-se a fração magnética, que deve ser secada, pesada e enviada para realização de análise química, cujo resultado é essencial à realização dos balanços de massa e metalúrgico.

Na terceira e última fase da operação, o campo magnético é desligado e a matriz é deslocada para a posição de lavagem do concentrado. Utiliza-se um fluxo de água, segundo o percurso 6 e 3 da Figura 6. A pressão (psi) e a vazão (L/h) desse fluxo de água são variáveis de processo e, portanto, devem ser otimizadas e registradas pelo operador. A pressão utilizada situa-se na faixa de 40 a 50 psi, permitindo a coleta do concentrado magnético.

Na Tabela 2 constam as condições operacionais de testes em separadores Jones para laboratório e piloto, inclusive os resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 2 – Condições operacionais e resultados obtidos nos ensaios com separadores de magnéticos BOXMAG RAPID e Separador Jones tipo carrossel.

Ensaio com Separador BOXMAG RAPID							
Condições Operacionais do Ensaio							
Quantidade de amostra	70 g						
Granulometria da amostra	- 0,8 mm e +53 µm						
Percentagem de sólidos na Alimentação	30%						
Dimensões matriz magnética	1,5 X 3,0 mm						
Água de lavagem dos mistos							
Registros do funil e da câmara	90°						
Tempo de lavagem dos mistos	15 s						
Amostra	CM (kGauss)	Corrente (A)	Magnéticos (%)			Misto	NM
			Peso	Fe	SiO <sub>2</sub>		
1	12	4,5	75,60	66,99	1,44	14,76	9,64
2	13	5,5	83,04	67,17	1,50	8,36	8,58
3	14	6,3	89,71	66,62	1,76	4,42	5,87
CM – Campo magnético; NM - Não magnético.							
Ensaio com Separador CF 5 Tipo Jones							
Condições Operacionais do Ensaio							
Granulometria da amostra	Abaixo de 0,8 mm						
Vazão da Alimentação	60,0 kg/h						
Percentagem de sólidos na alimentação do separado	30-40%						
Rotação do tambor do separador	1,5 rpm						
Intensidades de corrente	9; 10; e 11 A.						
Água de lavagem dos mistos	0,5 galão/min						
Pressão de entrada no ciclone	10 psi						
Pressão da água de lavagem do magnético	10 psi						
Produtos	Peso	Teor (%)		Distribuição (%)			
	(%)	Fe	SiO <sub>2</sub>	Fe	SiO <sub>2</sub>		
Magnético	55,13	67,73	2,84	58,10	28,20		
Misto	8,61	65,03	3,72	8,70	5,80		
Não magnético	31,96	59,54	10,40	29,60	59,90		
Overflow do hidrociclone	4,30	52,85	7,94	3,60	6,1		
Alimentação	100,00	63,26	4,48	-	-		

## 5. A SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA

O princípio da separação eletrostática baseia-se no fato de que os minerais de um determinado minério podem receber cargas superficiais, quando submetidos a um campo elétrico. Os minerais podem obter cargas positivas ou negativas, dependendo das condições de eletrização dos mesmos. Uma vez carregadas, as partículas minerais percorrem trajetórias distintas ao atravessarem uma determinada região do espaço, na qual há um campo elétrico. Este princípio é muito utilizado na separação de minerais.

Os equipamentos de separação são denominados, atualmente, de separadores eletrodinâmicos, entretanto o termo eletrostático ainda é comumente utilizado, pois os primeiros separadores eram de natureza puramente estática (Dutra, 2006). Os equipamentos modernos utilizam a energia elétrica em forma de fluxo iônico; por essas razões são denominados de eletrodinâmicos (Sampaio e Luz, 2004).

Todo mineral possui um determinado grau de condutividade. Dessa forma, um processo de separação eletrostática usará, como princípio, a diferença entre a condutividade elétrica ou cargas superficiais existentes nas diversas espécies mineralógicas a serem separadas (Venkatraman *et al.*, 2006).

Para que a separação ocorra, há a necessidade da existência de dois fatores elétricos:

- (i) a existência de carga elétrica superficial ou polarização induzida, para sofrer a influência do campo elétrico;
- (ii) um campo elétrico com intensidade suficiente para desviar uma partícula eletricamente carregada, quando se movimenta na região do espaço, na qual há um campo elétrico.

Quando partículas minerais estão sob a ação de um campo elétrico, elas podem acumular cargas elétricas. Isso dependerá diretamente da sua condutividade, densidade máxima de carga e área superficial (Venkatraman *et al.*, 2006). A partícula eletricamente carregada poderá ser separada, tanto por atração diferencial, quanto por repulsão ao campo elétrico. Dessa forma, é imprescindível que as mesmas sejam submetidas aos mecanismos de geração de cargas eletrostáticas e superficiais.

A eletrização por contato ou triboeletrização, indução condutiva e bombardeamento iônico são os mecanismos de eletrização mais utilizados no processamento mineral, cujos detalhes são encontrados em Sampaio e Luz (2004).

Uma vez carregadas, as partículas poderão ser submetidas ao processo eletrostático de separação, utilizando equipamentos das mais diversas configurações.

A separação eletrostática é aplicada na concentração de um pequeno grupo de minerais e, geralmente, é combinada com processos, como: separação gravítica e magnética. A separação gravítica é utilizada para remover contaminantes como sílica e produzir um concentrado de minerais. A separação magnética é utilizada para a separação dos diferentes minerais presentes no concentrado (Kelly e Spottiswood, 1982).

Alguns processos nos quais a separação eletrostática é tipicamente utilizada são citados a seguir (Lawver e Hopstock, 1985):

- (i) concentração de minerais, como ilmenita, rutilo, zircônio, apatita, asbestos, hematita, dentre outros;
- (ii) purificação de alimentos, especialmente na remoção de excrementos de grãos de cereais;
- (iii) recuperação de rejeitos reutilizáveis, como no caso da separação de fios de cobre do seu material isolante;
- (iv) classificação eletrostática por tamanho e forma das partículas.

### **Fatores de Influência no Processo de Separação Eletrostática**

A energia eletrostática na superfície das partículas está relacionada à natureza das mesmas e às características do ambiente operacional. Dessa forma, as partículas devem possuir superfície livre de recobrimentos (lama, umidade e matéria orgânica), para que os fenômenos de superfície, pertinentes ao mecanismo de eletrização, possam ocorrer (Sampaio e Luz, 2004). O processo de separação eletrostática depende de vários fatores que influenciam diretamente na eficiência do mesmo, como alguns descritos a seguir.

**Recobrimento das partículas** – Estas deverão estar isentas de umidade, matéria orgânica e também de partículas muito finas (lama) na superfície. Algumas técnicas de limpeza são utilizadas, como a lavagem da superfície, atrição convencional e adição de produtos químicos. Um exemplo da importância do tratamento da superfície é o caso da hematita, com resistividade igual a  $5 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$  antes da deslamagem, que, após a remoção da lama, foi alterada para  $2 \times 10^{-2} \Omega\text{m}$ .

**Temperatura da alimentação** – Alguns minerais podem ter a sua condutividade elevada pelo aumento da temperatura. Desse modo, uma eficiência mais elevada no processo de separação é atingida nas operações realizadas a temperaturas elevadas. Um exemplo é o rutilo, cuja condutividade é mais elevada em temperaturas acima de  $90^\circ\text{C}$ .

**Ambiente de separação** – A superfície das partículas nem sempre é mantida livre de umidade. Não basta apenas secá-la antes da separação. É necessário manter as partículas em um ambiente isento de umidade, o que torna o processo operacionalmente complexo e oneroso. A umidade superficial reduz a eficiência de separação, com predominância nos separadores eletrostáticos comparados aos de alta tensão, sucede-se que estes últimos utilizam mecanismos de eletrização de partículas menos sensíveis a umidade.

**Distribuição granulométrica da alimentação** – Materiais com granulometria muito grossa não são recomendados na alimentação dos separadores eletrostáticos por diversas razões. Partículas grossas possuem menor superfície específica, conseqüentemente, menor carga superficial, o que proporciona a geração de uma força eletrostática menor do que o seu peso individual. Por essas e outros motivos são apropriadas ao processo em separadores eletrostáticos. Com isso, partículas grossas e condutoras são direcionadas à fração não condutora, reduzindo a eficiência do processo de separação.

### **Tipos de Separadores Eletrostáticos**

Os mecanismos de eletrização das partículas respondem, de forma direta, pela natureza e configuração dos tipos de separadores. Entretanto, eles

mantêm em comum alguns componentes básicos, como sistema de alimentação e coleta dos produtos, campo elétrico externo, entre outros.

O campo elétrico ou potencial empregado varia com o tipo de equipamento, sendo mais usuais as faixas entre 10 e 100 kV para o potencial, e  $4 \times 10^4$  e  $3 \times 10^6$  V/m para o campo elétrico.

Aos mecanismos de eletrização das diferentes espécies mineralógicas contidas no minério, sucede-se à existência de dois tipos de separadores, ou seja:

- (i) os eletrodinâmicos, em que predomina ocorre o mecanismo de carregamento das partículas por meio de bombardeamento iônico;
- (ii) os eletrostáticos, que utilizam o mecanismo de atrito ou condução.

Os separadores eletrodinâmicos de alta tensão e os de placas condutoras são os mais utilizados na indústria e serão discutidos neste Capítulo.

### **Separadores Eletrodinâmicos**

Conhecidos como separadores de alta tensão, esses equipamentos são constituídos de um tambor rotativo aterrado, eletrodos, escovas de limpeza e as diversas calhas de trajetórias diferenciadas das partículas.

Na Figura 7 consta uma representação esquemática do separador eletrodinâmico. A amostra contendo a mistura de minerais com diferentes condutividades elétricas é alimentada sobre a superfície do tambor (A) e logo recebe o bombardeamento iônico por meio do eletrodo de ionização (trecho B-C). O eletrodo funciona com corrente contínua, potencial na faixa de 50 kV e polarização negativa. As partículas minerais submetidas ao fluxo iônico são carregadas negativamente, devido ao intenso efeito corona (fenômeno luminoso que ocorre durante uma descarga elétrica), e permanecem aderidas à superfície do tambor até entrar no ambiente de ação do eletrodo estático (trecho C-D). Esse eletrodo estático tem a finalidade de reverter as cargas das partículas condutoras, por indução, fazendo com que estas se desprendam da superfície do tambor e modifiquem a sua trajetória inicial. Assim, são coletadas como material condutor.

A fração dielétrica, com carga negativa, permanece aderida à superfície do tambor e é removida com o auxílio da escova e do eletrodo de corrente alternada, que promove a eficiência do processo de limpeza.

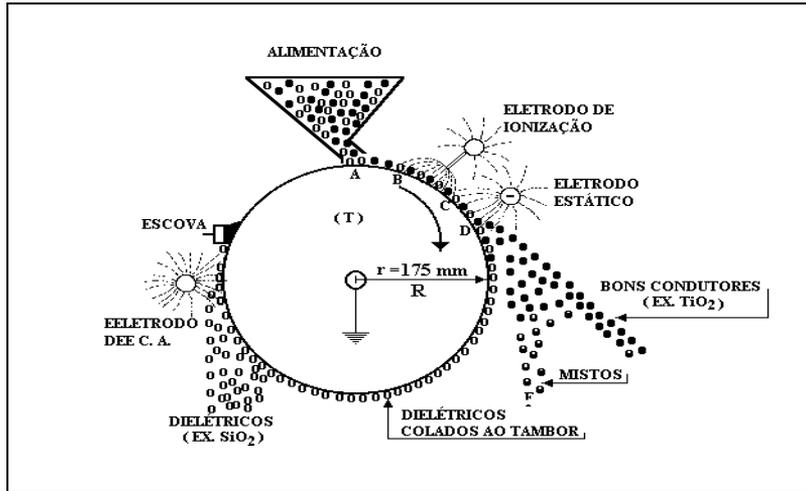


Figura 7 – Diagrama esquemático do separador eletrodinâmico de tambor ou de alta tensão.

Os separadores eletrodinâmicos são disponibilizados no mercado com diferentes diâmetros e comprimentos dos tambores. Dessa forma, são encontrados industrialmente equipamentos com diâmetros variando entre 150 e 240 mm e comprimento de até 3 m. A capacidade do separador é calculada em termos da alimentação que atravessa o tambor, por unidade de tempo e de comprimento deste, expressa em kg/h.m. Valores típicos de capacidade de separadores eletrodinâmicos são de 2.500 kg/h.m, para minério de ferro, e de 1.000 kg/h.m, para areia monazítica.

### Separador de Placas Condutoras

A eletrização por contato é o mecanismo de carregamento de superfície utilizado com maior frequência na separação de duas espécies dielétricas. Exemplos de aplicação desse processo são a separação de feldspato-quartzo, quartzo-apatita e também halita-silvita, utilizando equipamentos que consistem de duas placas paralelas carregadas, uma com carga negativa e outra positiva, além de um elevado gradiente de campo elétrico entre elas.

Os separadores de placas condutoras operam com forças eletrostáticas de baixa intensidade, limitando a sua utilização a minérios com granulometria mais grossa (entre 200 e 2.000  $\mu\text{m}$ ). Deve-se atentar para a relação entre o diâmetro das partículas e a sua densidade, pois, à medida que a densidade da partícula aumenta, a ação do campo elétrico sobre esta partícula torna-se menor devido ao aumento da sua velocidade de queda. Quando as partículas são muito finas e tendem a aglomerar-se, a eficiência do processo de separação também é reduzida (Lawver *et al.*, 1986).

A Figura 8 ilustra um separador eletrostático de placas condutoras. O equipamento é constituído por duas placas, uma condutora (que pode ser uma tela) e outra que é um grande eletrodo. A alimentação, composta por uma mistura de minerais, é feita entre as placas, entre as quais fluem por gravidade as partículas dos minerais. Por essa razão, estes equipamentos são também conhecidos como separadores de queda livre. A eletrização das partículas se dá por indução, sobre a placa condutora, pela ação do campo elétrico, devido ao eletrodo. Assim, ocorre a transferência de elétrons dos minerais condutores através da placa (ou tela) tornando-os positivos. As partículas condutoras são atraídas pelo eletrodo, modificando a sua trajetória.

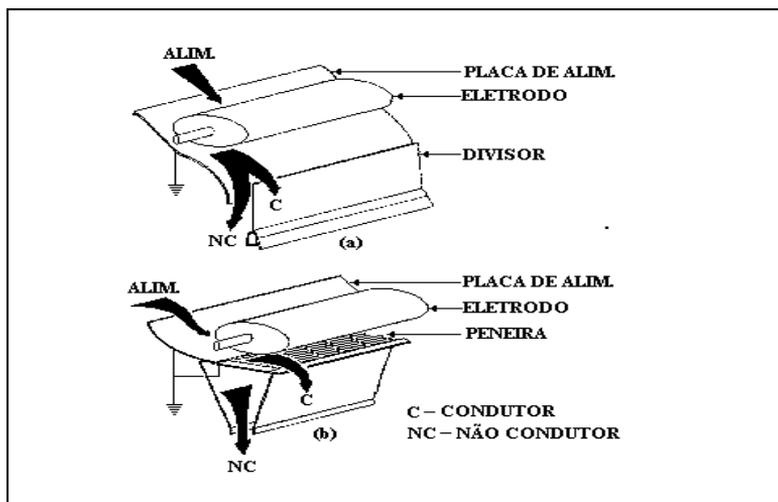


Figura 8 – Diagrama representativo dos separadores de placas condutoras.

A densidade máxima de carga elétrica que se pode ter no ar é de  $27 \times 10^{-6}$  C/m<sup>2</sup> (Lawver e Hopstock, 1985). Entretanto, os processos de carregamento da superfície ocorrem apenas na área exposta ao contato. Além da grande irregularidade na forma das partículas minerais, o valor efetivo de carregamento é, em média, de  $1,4 \times 10^{-6}$  C/m<sup>2</sup>.

Atualmente esses equipamentos são pouco utilizados, devido à maior capacidade e eficiência dos separadores eletrodinâmicos e do emprego, cada vez maior, do processo de flotação (Kelley e Spotswood, 1982; Sampaio e Luz, 2004).

### **Operação dos Separadores Eletrostáticos**

A condução de ensaios de separação eletrostática, em laboratório, inicia-se com a necessidade do conhecimento das características granulométricas, químicas e mineralógicas do minério a ser tratado. Assim, destacam-se:

- (i) composição química e mineralógica do minério a ser tratado, inclusive a sua granulometria de liberação e propriedades elétricas das partículas;
- (ii) características superficiais das partículas, como existência de matéria orgânica, lama, que requerem pré-tratamentos para limpeza dessas superfícies;
- (iii) distribuição granulométrica e densidade da amostra, que indicarão o tipo mais adequado de separador a ser utilizado.

Essas informações poderão indicar o mecanismo de carregamento ou eletrização mais adequado à separação dos minerais da amostra, inclusive a seleção do separador eletrostático a ser utilizado.

Para a execução de um ensaio em separador eletrostático tipo tambor, de alta tensão, o operador deverá seguir algumas etapas experimentais, que serão explicitadas a seguir (Lawver *et al.*, 1986).

**Escolha do tamanho do tambor** – é função da granulometria do material a ser processado. Para materiais com granulometria grossa, acima de 6,35 mm (1/4”), aconselha-se o uso do tambor com diâmetro de 356 mm; materiais com

granulometria mais fina, na faixa de 0,07 a 1,0 mm, são melhor separados em tambores de 254 mm (10").

**Velocidade de rotação do tambor** – os valores mais usuais situam-se na faixa entre 80 a 200 rpm. Entretanto, para minérios muito finos indicam-se operações do equipamento com velocidades mais elevadas. Entretanto, a rotação ideal é objeto dos estudos em laboratório. Neste caso são estudados os efeitos de adesão das partículas ao tambor e da força centrípeta, no caso de minérios com granulometria grossa.

**Alimentação do separador** – o minério deve sempre ser alimentado no separador, de forma constante, com auxílio de um alimentador vibratório ou com parafuso sem fim. A taxa de alimentação depende do tipo de material e varia na faixa de 900 a 1800 kg/h.m. Portanto, a taxa de alimentação é objeto de estudo em laboratório, e aconselha-se, ao operador, iniciar as investigações com alimentações (kg/h) menores e, em seguida, proceder ao aumento da mesma, até atingir o valor ideal da vazão.

**Tipo de eletrodo para eletrização das partículas** – o eletrodo de feixe é utilizado para carregar todas as partículas da amostra e fazer com que as não condutoras permaneçam aderidas ao tambor. O eletrodo estático irá atrair as partículas condutoras, provocando o seu desprendimento da superfície do tambor. Dessa forma, a utilização de apenas um tipo de eletrodo ou da combinação dos dois dependerá da granulometria das partículas condutoras e não condutoras contidas no minério, conforme ilustrado no Quadro 2.

Quadro 2 – Tipo de eletrodo de eletrização em função do tamanho de partículas (Lawver *et al.*, 1996).

Tamanho de partícula		Tipo e quantidade de eletrodo
condutoras	Não condutoras	
Grossas	Grossas	2 – feixe
Grossas	Finas	1 – feixe
Finas	Grossas	1 – feixe 1 – estático
Finas	Finas	1 – feixe 1 – estático

O operador poderá variar a voltagem e a distância entre o eletrodo e a superfície do tambor, para otimizar a recuperação do concentrado.

No Quadro 3 estão os principais procedimentos, materiais e equipamentos que podem ser utilizados nos ensaios de laboratório. O operador poderá ampliá-los, de acordo com as necessidades pertinentes a cada caso.

Quadro 3 – Procedimentos, materiais e equipamentos utilizados nos testes de separação eletrostática em laboratório.

Itens	Discriminação
1	Providenciar a limpeza completa de todos os equipamentos a serem usados na realização dos experimentos.
2	Verificar se o alimentador vibratório e o separador eletrostático estão funcionando devidamente, isto é, todas as suas partes, inclusive a lubrificação dos mesmos.
3	Certificar-se de que a amostra está devidamente seca e as partículas livres de impurezas na superfície.
4	Iniciar o ensaio com baixos valores de taxa de alimentação da amostra; lembrar que estes valores deverão ser calculados em função do comprimento do tambor utilizado.
5	Verificar se o separador encontra-se em estado ideal de funcionamento.
6	Verificar se o ambiente encontra-se com umidade ideal para o ensaio, isto é, com baixas taxas de umidade.
7	Se necessário, regular a posição dos eletrodos em relação à superfície do tambor, para obtenção de melhores valores de recuperação do concentrado.
8	Ao término da alimentação, permanecer com o equipamento ligado até que todas as partículas não condutoras sejam removidas da superfície do tambor pela escova.
9	Desligar o equipamento e proceder à limpeza do mesmo para o próximo ensaio ou operador.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Dutra, R. Beneficiamento de minerais industriais. Anais do II Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, [www.pg.cefetpr.br/ppgep/anais](http://www.pg.cefetpr.br/ppgep/anais), 2006, 10p.
- Kelly, E. G. e Spottiswood, D. J. Introduction to mineral processing. New York: John Wiley & Sons, 1982, p.291-300.
- Lawver, J.E. e Hopstock, D.M. Electrostatic and Magnetic Separation. In: L.S. Weiss (Ed). SME Mineral Processing Handbook, vol 1., cap 6, 1985, p.1-48.
- Lawver, J. E.; Taylor, J.B. e Knoll, F.S. Laboratory testing for electrostatic concentration circuit design. In: Mular, A. and Anderson, M. A. (Ed.). Design and installation of concentration and dewatering circuits. SME, 1986, p.454-477.
- Sampaio, J. A. e Luz, A. B. Separação magnética e eletrostática. In: Luz, A. B.; Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (Ed.). Tratamento de Minérios. 4ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p. 303-335.
- Venkatraman, P.; Knoll, F. S. e Lawver, J.E. Magnetic and electrostatic separation. In: Principles of Mineral Processing, Eds. Fursteneau, SME Editors, 2006, p. 221-244.
- Almeida, S. L. M. e Luz, A. B. Concentração magnética do minério de ferro de Lafaiete: ensaios em escala piloto. Relatório técnico do CTEM. Rio de Janeiro, 1980.