

**CETM**

Curso de Especialização em  
Tratamento de Minérios

# Concentração física de minerais

6. Separação eletrostática

Prof. Dr. André Carlos Silva

# 1. INTRODUÇÃO

- A separação eletrostática é um processo de concentração de minérios que se baseia nas diferenças de algumas de suas propriedades, tais como:
  - Condutibilidade elétrica;
  - Susceptibilidade em adquirir cargas elétricas superficiais;
  - Forma geométrica;
  - Densidade entre outras.

# 1. INTRODUÇÃO

- Para promover a separação é necessária a existência de dois fatores elétricos:
  - Um campo elétrico de intensidade suficiente para desviar uma partícula eletricamente carregada, quando em movimento na região do campo;
  - Carga elétrica superficial das partículas, ou polarização induzida, que lhes permitam sofrer a influência do campo elétrico.

# 1. INTRODUÇÃO

- O termo eletrostático é empregado com freqüência porque os primeiros separadores eram de natureza puramente eletrostática, sem o chamado fluxo iônico.
- Atualmente são usados equipamentos avançados, com maior aplicação comercial, em que a energia elétrica é aplicada em forma de fluxo iônico e denominada de eletrodinâmica.

# 1. INTRODUÇÃO

- 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.
- No período de 1920-1940, com o advento da flotação, houve pouca utilização do processo.

# 1. INTRODUÇÃO

- 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.

# 1. INTRODUÇÃO

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

# 1. INTRODUÇÃO

- Para os equipamentos modernos tal granulometria mínima pode ser estimada na faixa de 20  $\mu\text{m}$ .

## 2. 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.

## 2. ELETRIZAÇÃO DE PARTÍCULAS MINERAIS

- 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  $\mu\text{m}$ .

## 2. ELETRIZAÇÃO DE PARTÍCULAS MINERAIS

- 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 apresentam relevância para o método de separação.

## 2. ELETRIZAÇÃO DE PARTÍCULAS MINERAIS

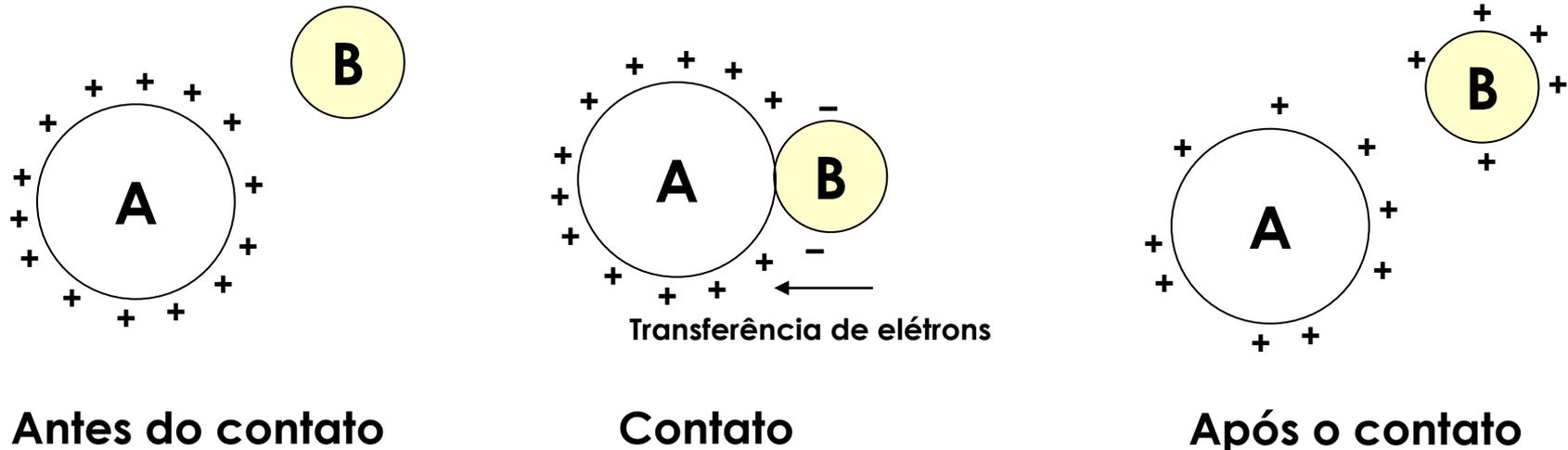
- São usadas eletrizações **por contato** ou **atrito**, **por indução** e **por bombardeamento iônico**.
- Cada processo proporciona certo aumento na carga superficial das partículas; no entanto, as operações práticas são levadas a efeito por dois ou mais mecanismos conjuntamente.

## 2.1. 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.

## 2.1. Eletrização por contato (ou atrito)

- 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.



## 2.1. Eletrização por contato (ou atrito)

- Tal processo de eletrização está ligado à natureza e a forma das partículas envolvidas.
- Bons resultados são obtidos com operações repetidas, que são necessárias por causa da pequena área de contato entre as partículas.

## 2.1. Eletrização por contato (ou atrito)

- 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 chegar a uma densidade elevada de carga superficial, o que favorece à separação.

## 2.1. Eletrização por contato (ou atrito)

- 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.

## 2.1. Eletrização por contato (ou atrito)

- Em segundo lugar, está a carga residual de cada material após interrompido o contato entre eles, **fenômeno ainda sem explicação**.
- Na verdade, pouco se sabe como controlar ou quantificar a carga elétrica que pode permanecer após cessar o contato entre os materiais.

## 2.1. Eletrização por contato (ou atrito)

- 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 outros.

## 2.2. 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.

## 2.2. Eletrização por indução

- Por meio da indução, tanto o material condutor quanto o dielétrico adquirem cargas elétricas; no entanto os primeiros apresentam uma superfície equipotencial quando em contato com a superfície aterrada.
- As partículas dielétricas submetidas à indução tornam-se polarizadas devido à transferência de cargas.

## 2.2. Eletrização por indução

- As partículas condutoras deixam fluir suas cargas através da superfície aterrada.
- Ficam então, com carga de mesmo sinal ao da superfície aterrada e são repelidas por ela.

## 2.2. Eletrização por indução

- Já as não condutoras sofrem apenas polarização, conforme mostrado na figura abaixo.
- Elas ficam então aderidas à superfície como consequência da atração eletrostática.

## 2.2. Eletrização por indução

CAMPO ELÉTRICO NEGATIVO

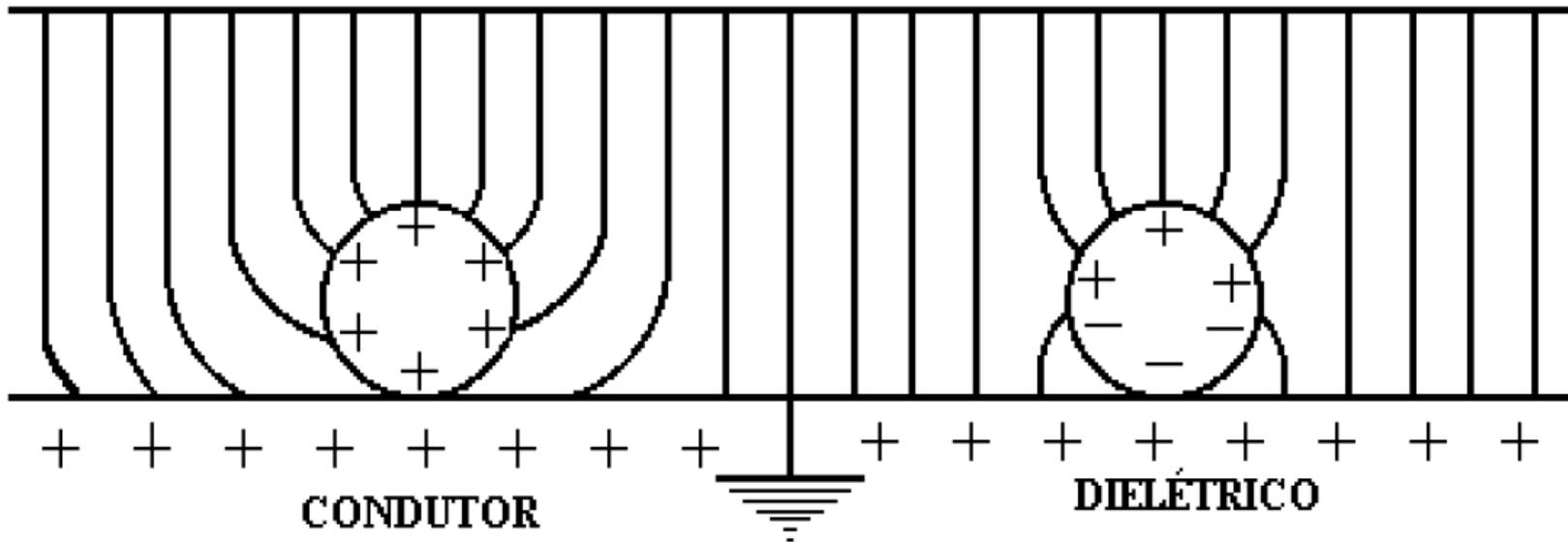


Diagrama representativo de duas partículas após o carregamento por indução

## 2.2. Eletrização por indução

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

## 2.3. Eletrização por bombardeamento iônico

- Os gases, nas CNTP, não conduzem a corrente elétrica, comportando-se como dielétricos.
- Por outro lado, se submetido a um potencial elevado, ocorre uma descarga iônica e, conseqüentemente, a condução da corrente elétrica.

## 2.3. Eletrização por bombardeamento iônico

- A intensidade da descarga depende da forma dos eletrodos, que estabelecem o potencial.
- Na realidade, o que ocorre é um fluxo iônico entre os eletrodos de pequenas dimensões.
- Na prática, os melhores resultados são obtidos usando-se eletrodo fabricado com fio de tungstênio e diâmetro da ordem de 0,25 mm.

## 2.3. Eletrização por bombardeamento iônico

- Denomina-se efeito corona ao 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, sendo um dos mecanismos mais eficientes de carregamento.

## 2.3. Eletrização por bombardeamento iônico

- 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.

## 2.3. Eletrização por bombardeamento iônico

- Trata-se de um processo caro, envolvendo equipamento de alta tensão e, na prática, os melhores resultados são obtidos quando o mecanismo está associado a outro, como exemplo, a eletrização por contato e com repetidas etapas de limpeza.

## 2.3. Eletrização por bombardeamento iônico

- O procedimento prático consiste em fazer passar, através da região do espaço onde 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 que as dielétricas as retêm, permanecendo coladas à mesma.

## 2.3. Eletrização por bombardeamento iônico

- A força que mantém as não condutoras coladas à superfície é chamada de “força de imagem”.

## 3. 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.

## 3. TIPOS DE SEPARADORES

- O potencial e/ou campo elétrico variam com o tipo de separador.
- Usualmente opera-se com potenciais entre 10 a 100 kV, enquanto que o campo elétrico está compreendido na faixa de  $4 \times 10^4$  até  $3 \times 10^6$  V/m.

## 3. TIPOS DE SEPARADORES

- A forma de um separador está essencialmente relacionada ao tipo de mecanismo utilizado no carregamento das diferentes espécies mineralógicas presentes à separação.
- Com efeito, existem dois tipos básicos de equipamentos: os **eletrodinâmicos** e os **eletrostáticos**.

## 3. TIPOS DE SEPARADORES

- Nos primeiros empregam-se o fluxo iônico com transferência de cargas, enquanto que 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.

## 3.1. Separadores eletrodinâmicos

- Eles possuem a configuração apresentada esquematicamente na figura abaixo, onde se observa o tambor rotativo (T) aterrado, os eletrodos, 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 onde recebe o bombardeamento iônico (trecho **BC**) por meio do eletrodo de ionização.

## 3.1. Separadores eletrodinâmicos

- 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 aderidas à superfície até entrarem na região de ação do eletrodo estático (trecho **CD**).

## 3.1. Separadores eletrodinâmicos

- 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, mudando a sua trajetória e coletadas 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.

## 3.1. Separadores eletrodinâmicos

- O dispositivo tem a função adicional de tornar mais eficiente o processo de limpeza com a escova.
- Quanto as dimensões os separadores são avaliados em relação ao diâmetro e comprimento do tambor.

## 3.1. Separadores eletrodinâmicos

- Assim, são fabricados equipamentos com diâmetros que variam na faixa de 150 a 240 mm e comprimento até 3 m.
- A capacidade é calculada em termos da alimentação que atravessa o tambor nas unidades de tempo e de comprimento do mesmo, 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.

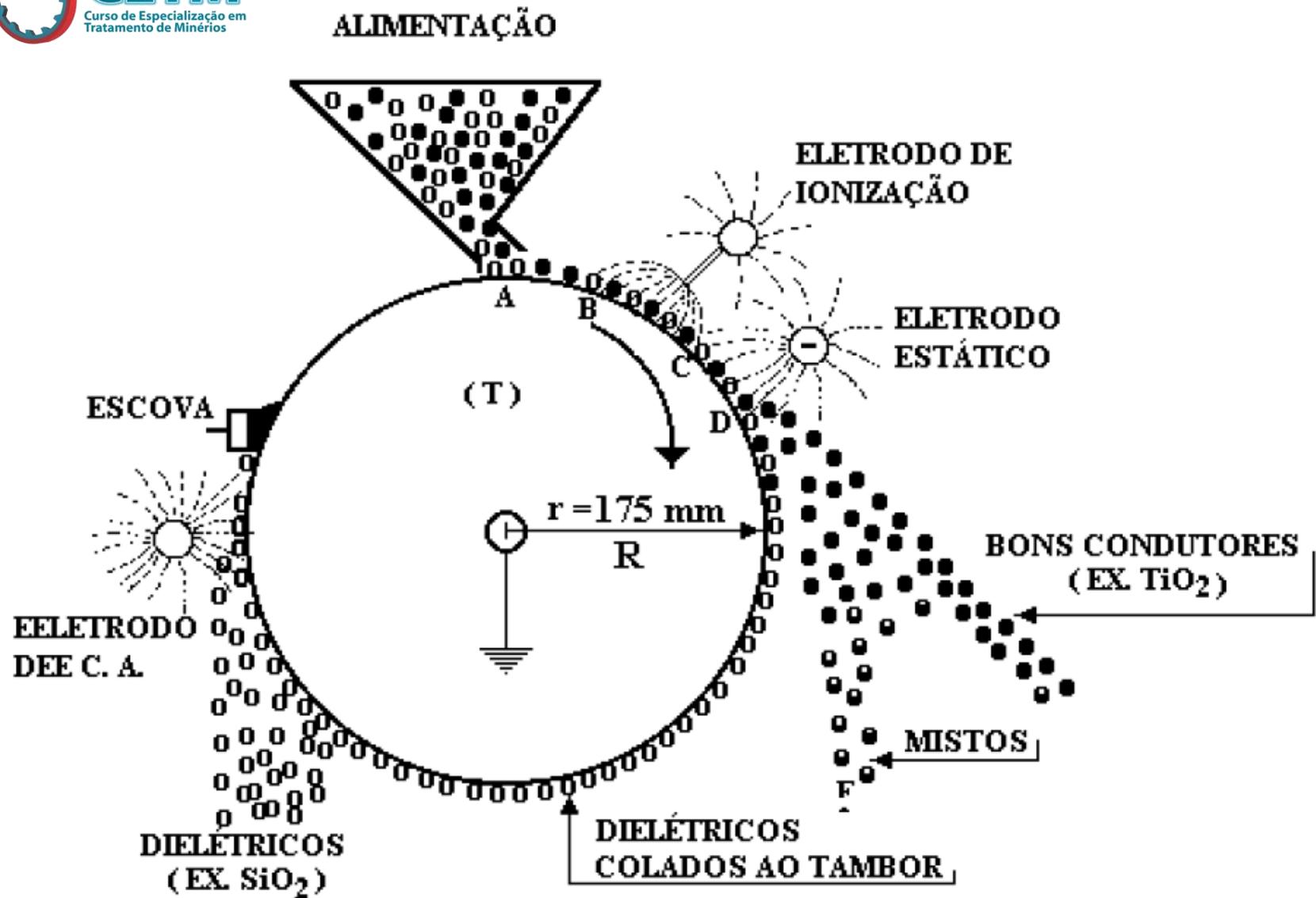


Diagrama esquemático do separador eletrodinâmico ou de alta tensão

<b>Minerais que se prendem ao tambor (NC)</b>		<b>Minerais que não se prendem ao tambor (C)</b>	
Apatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{OH},\text{Cl})$	Cassiterita	$\text{SnO}_2$
Barita	$\text{BaSO}_4$	Cromita	$\text{FeCr}_2\text{O}_4$
Calcita	$\text{CaCO}_3$	Esfalerita	$\text{ZnS}$
Cianita	$\text{Al}_2\text{SiO}_5$	Estibnita	$\text{Sb}_2\text{S}_3$
Coríndon	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Galena	$\text{PbS}$
Garnierita		Goetita	$\text{FeO}(\text{OH})$
Gibsita		Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Ilmenita	$\text{FeTiO}_2$
Monazita	$(\text{Ce},\text{La},\text{Nd},\text{Th})\text{PO}_4$	Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$
Quartzo	$\text{SiO}_2$	Ouro	$\text{Au}$
Scheelita	$\text{CaWO}_4$	Pirita	$\text{FeS}_2$
Sillimanita	$\text{Al}_2\text{SiO}_5$	Rutilo	$\text{TiO}_2$
Turmalina	Borossilicato	Columbita-Tantalita	$(\text{Fe},\text{Mn})(\text{Nb},\text{Ta})_2\text{O}_6$
Zircão	$\text{ZrSiO}_4$	Wolframita	$(\text{Fe},\text{Mn})\text{WO}_4$

## 3.2. Separadores de placas condutoras

- Os primeiros separadores eletrostáticos utilizados na prática foram aqueles que consistiam de duas placas, uma carregada negativamente e outra positivamente, com elevado gradiente de campo entre elas.

## 3.2. Separadores de placas condutoras

- 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, a utilização do processo de flotação.

## 3.2. Separadores de placas condutoras

- O equipamento, conforme diagrama ilustrado na figura abaixo, possui duas placas, uma condutora e outra constituída de um eletrodo gigante.
- Em alguns modelos, a placa condutora é constituída de uma tela.

## 3.2. Separadores de placas condutoras

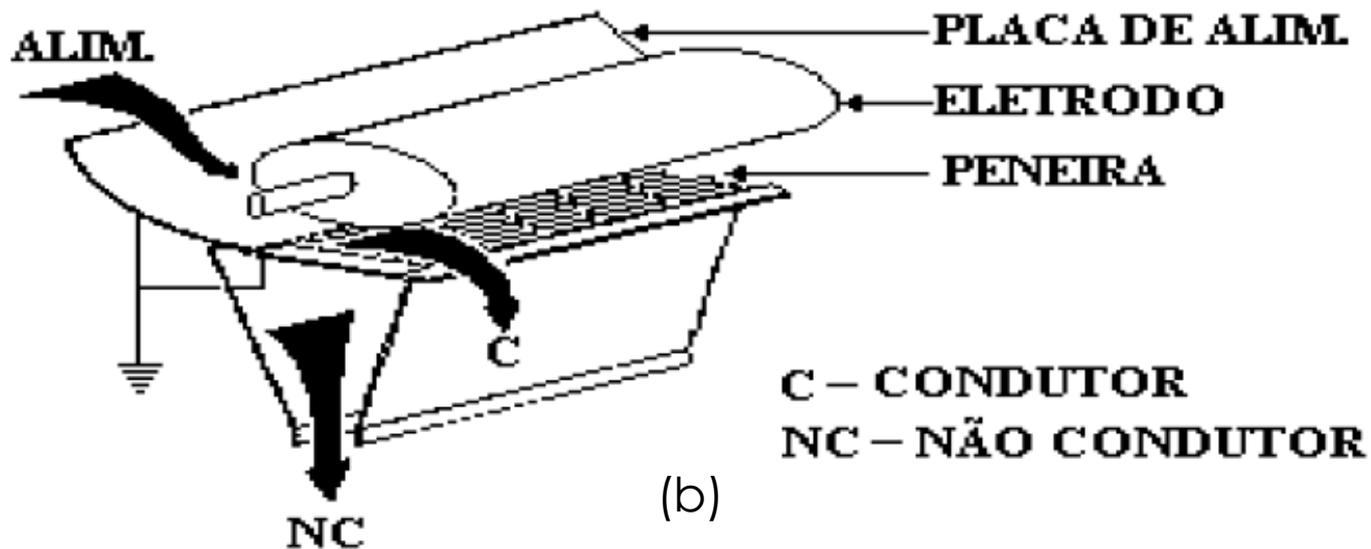
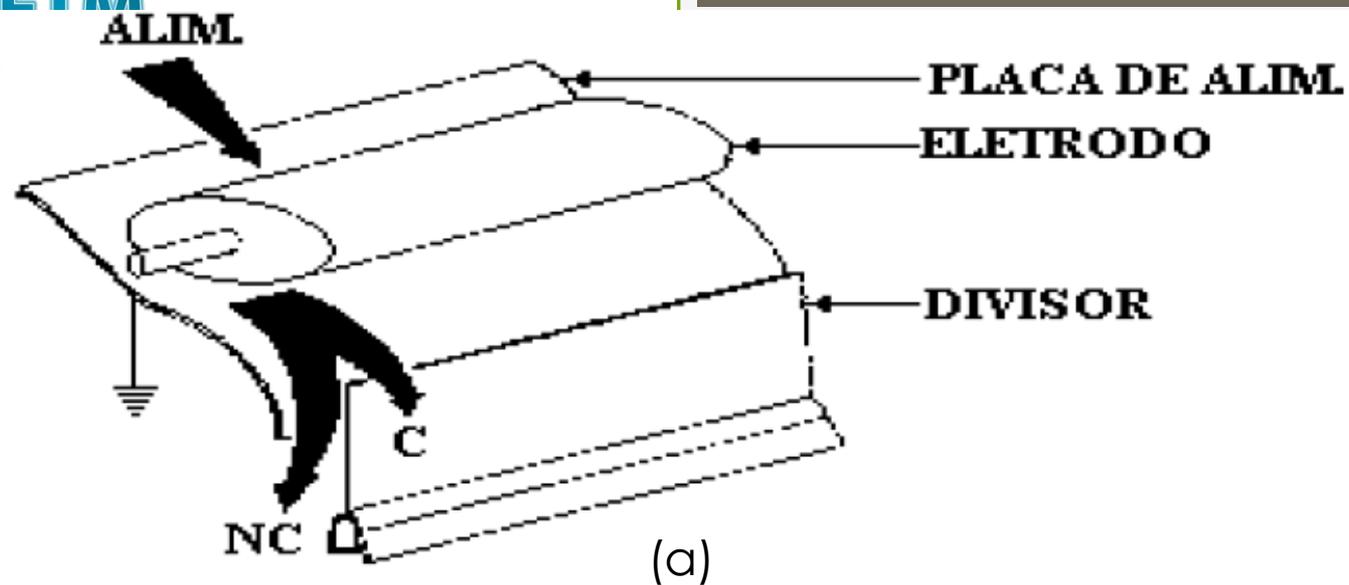
- A operação das duas modalidades apresenta diferença apenas na coleta do material condutor.
- A alimentação é feita entre as placas e os minerais fluem livremente por gravidade.

## 3.2. Separadores de placas condutoras

- 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.

## 3.2. Separadores de placas condutoras

- O procedimento resulta na atração das partículas condutoras pelo eletrodo, mudando a sua trajetória.



**C – CONDUTOR**  
**NC – NÃO CONDUTOR**

**Diagrama ilustrativo dos separadores de placas condutoras**

## 3.2. 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.

## 3.2. Separadores de placas condutoras

- 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.

## 3.2. Separadores de placas condutoras

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

## 4. INFLUÊNCIA DO AMBIENTE OPERACIONAL

- Toda e qualquer operação com energia sob a forma eletrostática está relacionada ao estado e natureza das superfícies comprometidas com o processo e as condições do ambiente de operação.
- Assim, na separação eletrostática as partículas devem possuir superfícies livres de contaminações e/ou sujeiras (matéria orgânica) e a área operacional estar isenta de poeira e umidade.

## 4. INFLUÊNCIA DO AMBIENTE OPERACIONAL

- De tal forma é possível obter a eletrização superficial das partículas submetidas à separação.
- Por tais razões, são introduzidas nas instalações industriais etapas de lavagem, atrição e secagem do material, antes da alimentação.

## 4. INFLUÊNCIA DO AMBIENTE OPERACIONAL

- 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  $5 \times 10^{-8}$  a  $2 \times 10^{-2} \Omega$ .
- Outro fator indesejável ao processo é a poeira ou fração ultrafina presente no minério, que deve ser eliminada, conduzindo-se a operação em ambiente sob vácuo para minimizar seus efeitos.

## 4. INFLUÊNCIA DO AMBIENTE OPERACIONAL

- 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.

## 4. INFLUÊNCIA DO AMBIENTE OPERACIONAL

- As operações com temperaturas elevadas, da ordem de  $60^{\circ}\text{C}$  na separação eletrostática de rutilo, têm sido usadas para diminuir as dificuldades causadas pela umidade.
- É conhecido que tal fator tem maior influência nos separadores eletrostáticos convencionais comparados aos de alta tensão.

## 4. INFLUÊNCIA DO AMBIENTE OPERACIONAL

- 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.

## 5. 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.

## 5. INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA

- Como conseqüência, a força eletrostática sobre as mesmas é menor que o peso individual de cada partícula.
- Tal fato justifica a presença de material grosso e condutor na fração não condutora, diminuindo a eficiência do processo.

## 5. INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA

- Por outro lado, 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.
- Como resultado, 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.

## 5. INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA

- 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.

## 6. PRINCIPAIS APLICAÇÕES

- O processo de separação eletrostática tem aplicações limitadas, tanto no processamento de minérios quanto em outras áreas, podendo ser citadas:
  - Concentração de minérios de ilmenita, rutilo, zircão, apatita, amianto, hematita e outros;
  - Purificação de alimentos, tal como, remoção de certas impurezas presentes nos cereais;

## 6. PRINCIPAIS APLICAÇÕES

- Remoção do cobre presente em resíduos industriais reaproveitáveis;
- Purificação dos gases em chaminés industriais, por meio de precipitação eletrostática.

## 6. PRINCIPAIS APLICAÇÕES

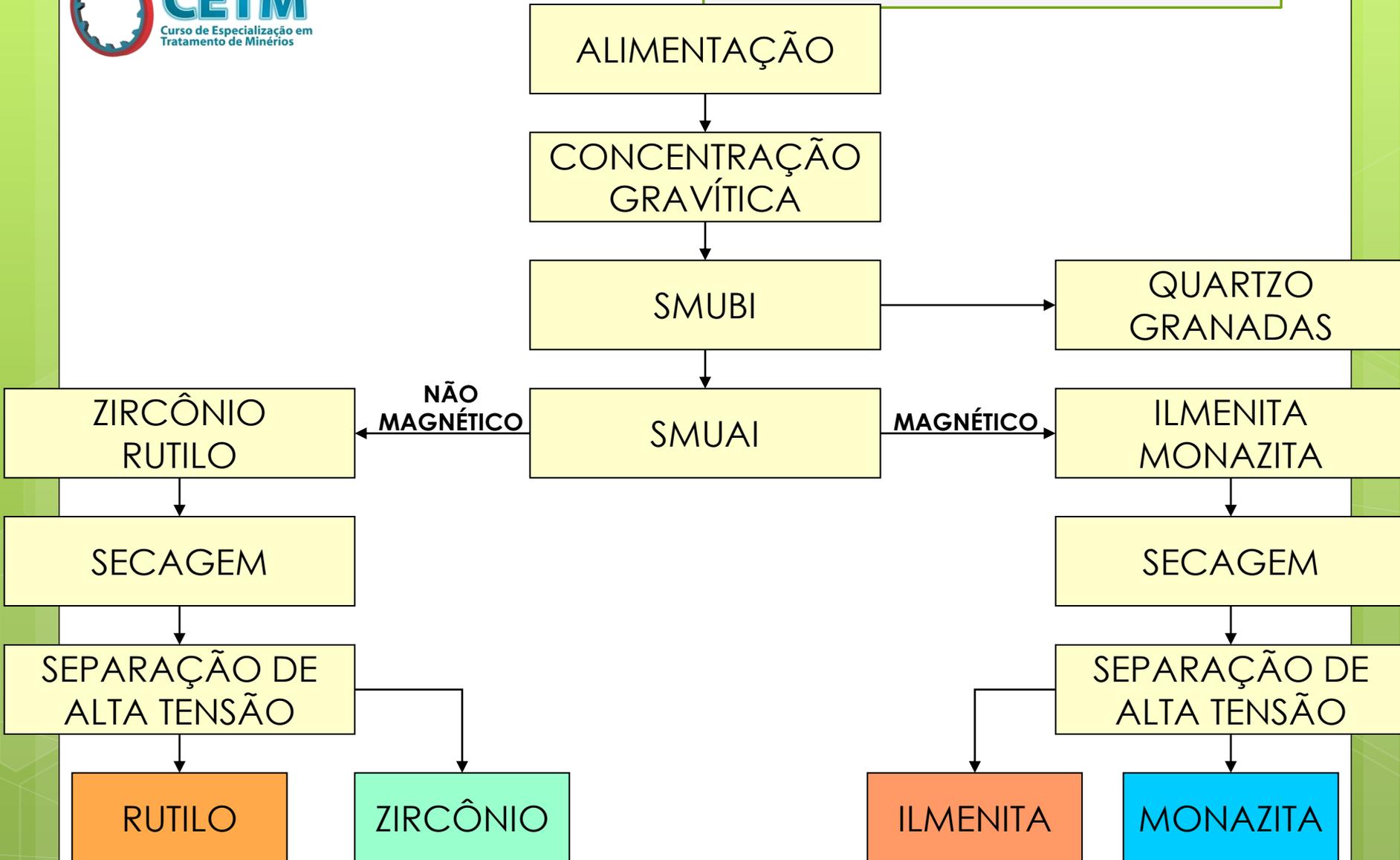
- A maior aplicação prática da separação eletrostática se verifica no processamento de areias monazíticas e depósitos aluvionários contendo minerais de titânio.
- No primeiro caso poucas são as operações que não utilizam o processo.

## 6. PRINCIPAIS APLICAÇÕES

- Na Flórida (E.U.A.) registram-se elevadas produções de concentrado de minerais pesados combinando as operações magnética e eletrostática.
- 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.

## 6. PRINCIPAIS APLICAÇÕES

- Tal procedimento pode ser observado em vários circuitos de processamento das areias monazíticas, conforme o fluxograma abaixo.



**Fluxograma simplificado típico para o processamento de areia monazítica**

## 7. AVANÇOS NA S. E.

- 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.

## 7. AVANÇOS NA S. E.

- 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.

## 7. AVANÇOS NA S. E.

- A concepção desse separador atingiu a etapa protótipo e os seus idealizadores recomendam para a separação de partículas sólidas finas, provenientes de misturas heterogêneas, apropriando-se das diferentes propriedades elétricas induzidas ou naturais.

## 7. AVANÇOS NA S. E.

- Outro tipo de separador eletrostático está sendo proposto por MESENYASHIN caracterizado por um determinado número de eletrodos de coleta constituídos por tubos ocos, com eletrodos de alta tensão, ao longo do eixo do tubo.
- Esse novo separador compreende vários tubos, com diâmetros variando de 80 a 200 mm.

## 7. AVANÇOS NA S. E.

- Comparado com o separador eletrostático convencional tipo tambor, esse novo equipamento apresenta como vantagem, uma maior superfície de eletrodos de coleta e, como conseqüência, maior capacidade por unidade de volume.
- O tratamento químico dos minerais está sendo utilizado na separação eletrostática.

## 7. AVANÇOS NA S. E.

- A ativação de substâncias minerais contendo feldspato e quartzo tem permitido a obtenção de concentrados com 82% de feldspato a partir de uma alimentação com 32%.