

**Pedro Henrique do Carmo Celestino**

**Investigação da Seletividade de Minério de Ferro em Separação Eletrostática**

**São Paulo  
2014**

**Pedro Henrique do Carmo Celestino**

**Investigação da Seletividade de Minério de Ferro por Separação Eletrostática**

Área de concentração  
Engenharia Mineral

Orientador:  
Homero Delboni Jr.

**São Paulo  
2014**

TF-2014

C33i

Sipus 264091

H 2014c

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700009814

**Celestino, Pedro Henrique do Carmo**

**Investigação da seletividade de minério de ferro por separação eletrostática / P.H.C. Celestino. -- São Paulo, 2014.**

**31 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.**

**1.Separação eletrostática 2.Minério 3.Ferro 4.Seletividade  
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.**

## **Agradecimentos**

Obrigado a todos os familiares pelo apoio incondicional em toda minha vida e que me trouxeram até aqui.

Obrigado aos meus mestres que me ensinaram o valor do conhecimento e renovam a cada dia o meu gosto pela ciência.

Obrigado aos meus amigos, pois eles são, diariamente, meus professores fora da escola.

Obrigado ao professor Homero Delboni Jr. pelo apoio, orientações valiosas e enriquecedoras ao trabalho e principalmente pela constante motivação transmitida durante os anos de graduação.

Obrigado ao Wellington Lacerda e Tiago Jatoba pela ajuda e sugestões em grande parte dos trabalhos.

Obrigado aos técnicos de laboratório da Inbrás e do LSC, sobretudo o Pedro, que com enorme paciência, simpatia e vontade de ajudar fez com que esse trabalho pudesse ter sido realizado.

Obrigado ao Professor Henrique Kahn e as pessoas do LCT que se dispuseram a contribuir com o trabalho e o fizeram com muita qualidade.

## Resumo

Um dos principais problemas recentes na área de tratamento de minérios é a falta de água, seja em minerações instaladas em locais com ausência natural de água ou em locais com problemas de distribuição da mesma ou recente escassez. A diminuição progressiva dos teores em jazidas resulta na necessidade de otimizar os processos de tratamento de minério.

A escassez de água determina, portanto, que sejam investigados processos de tratamento de minérios à seco. Dentro deste cenário decidiu-se investigar a seletividade da separação eletrostática, de forma a combinar um possível benefício de processo com um que não faça o uso de água.

Dentro deste contexto, esse trabalho teve como principal objetivo investigar o processo de separação eletrostática de uma amostra Minério de Ferro, após uma concentração prévia por separação magnética.

Os ensaios realizados resultaram em enriquecimento em ferro para uma determinada fração granulométrica (  $-0,59 +0,30$  mm), indicando, assim, potencial para investigação com maior profundidade de separação eletrostática para minério de ferro.

## **Abstract**

One of the main problems in recent ore treatment area is the lack of water, whether in mining installed in places with natural absence of water or in places with distribution problems or recent shortage. The progressive decrease of the levels in reservoirs results in the need to optimize the ore treatment processes.

Water scarcity determines, therefore, that the dry ore treatment processes are interesting to be investigated. Against this background, it was decided to investigate the selectivity of electrostatic separation, to arrange a possible benefit with a process that does not use water.

Within this context, this study aimed to investigate the electrostatic separation process with an Iron Ore sample, after prior concentration by magnetic separation.

The trials resulted in iron enrichment for a given size fraction ( $-0.59 +0.30$  mm), thereby indicating potential for research in greater depth electrostatic separation for iron ore.

## Índice

1. Introdução .....	1
2. Objetivo do trabalho .....	1
2.1. Organização do Trabalho.....	1
3. Revisão Bibliográfica:.....	2
3.1. Eletrização de Partículas.....	4
3.1.1. Eletrização por contato ou atrito .....	5
3.1.2. Eletrização por bombardeamento iônico.....	6
3.1.3. Eletrização por Indução .....	6
3.2. Condutividade .....	7
3.3. Teoria da Banda.....	8
3.4. Funcionamento dos Separados Eletrostáticos.....	10
3.5. Diferenciação das partículas .....	11
3.6. Sequência da passagem da partícula .....	12
3.7. Efeitos que causam desvios de desempenho.....	15
3.7.1. Efeito da umidade .....	16
3.7.2. Efeitos da Temperatura .....	17
3.7.3. Efeito de Impurezas.....	17
3.8. Granulometria .....	18
3.9. Descrição teórica do equipamento .....	19
3.10. Principais Aplicações .....	21
4. Metodologia .....	21
4.1. Cominuição.....	21
4.2. Peneiramento.....	21
4.3. Concentração .....	22
5. Resultados .....	24
5.1. Resultados Obtidos.....	24
5.2. Análise dos dados.....	25
6. Conclusão .....	30
7. Referências Bibliográficas .....	31

## Lista de Figuras:

Figura 1: Quatro tipos básicos de separadores eletrostáticos. ....	4
Figura 2: Diagrama representativo de duas partículas após o carregamento por indução .....	7
Figura 3: Energia por banda de condução.....	9
Figura 4: Diagramas de energia.....	9
Figura 5: Esboço de um separador eletrostático. ....	10
Figura 6: Perda de carga em função do tempo. ....	11
Figura 7: Sequencia da partícula em separador eletrostático. ....	12
Figura 8: Trecho AB. ....	13
Figura 9: Trecho BC.....	13
Figura 10: Trecho CF.....	14
Figura 11: Trecho Final (F).....	15
Figura 12: Exemplo de separador eletrostático. ....	20
Figura 13: Exemplo de separador eletrostático (2).....	20
Figura 14: Separador magnético de rolos .....	22
Figura 15: Separador eletrostático (Fonte: Inbrás) .....	23
Figura 16: Balanço mássico e metalúrgico das separações magnética e eletrostática -- Fração - 0,59 + 0,30 mm.....	26
Figura 17: Balanço mássico e metalúrgico da separação eletrostática -- Fração -0,59 +0,30 mm .....	26
Figura 18: Balanço mássico e metalúrgico das separações magnéticas e eletrostáticas -- - 0,30 + 0,106 mm .....	27
Figura 19: Balanço mássico e metalúrgico da separação eletrostática -- Fração -0,30 +0,106 mm .....	27

## Lista de Tabelas:

Tabela 1: Condutividade dos minerais .....	8
Tabela 2: Efeito da Umidade na temperatura do teste.....	16
Tabela 3: Diferenças na separação em relação a temperatura. ....	17
Tabela 4: Dados de massa quarteada para ser encaminhada a análise química. ....	22
Tabela 5: Resultado da análise química e massa das amostras.....	24
Tabela 6: Balanço de massa da fração ( -0,59 +0,30 mm).....	24
Tabela 7: Balanço de massa da fração -0,30 +0,106 mm. ....	25
Tabela 8: Índices de desempenho das separações magnéticas e eletrostáticas -- Fração -0,59 +0,30 mm .....	28
Tabela 9: Índices de desempenho das separações magnéticas e eletrostáticas -- Fração -0,59 +0,30 mm .....	28

## 1. Introdução

A separação eletrostática é uma técnica relativamente antiga de tratamento de minérios. Embora fosse bastante empregada no início do século XX o advento e consolidação da flotação resultou em declínio da separação eletrostática, entretanto algumas aplicações tradicionalmente utilizam separação eletrostática até os dias de hoje, como por exemplo a concentração de minerais de praia ("mineral sands"), combinação de rutilo, ilmenita e zirconita.

Os tipos de equipamentos e o conhecimento das técnicas específicas que determinam o sucesso do processo como um todo (influência das propriedades externas e internas na separação eletrostática) faz com este tipo de separação ainda não tenha sido explorado de forma integral.

## 2. Objetivo do trabalho

O objetivo desse trabalho foi analisar a seletividade do método de separação eletrostática para uma amostra de minério de ferro analisando-se a recuperação metalúrgica e enriquecimento desse processo para granulometrias diferentes.

### 2.1. Organização do Trabalho

O trabalho é composto por uma revisão bibliográfica, com foco na teoria e prática do método de separação. Em seguida serão apresentadas características do funcionamento dos equipamentos, sendo a explicação baseada principalmente na trajetória das partículas no equipamento. Segue-se uma explanação sobre a influência dos fatores externos no experimento e como isso influencia a eficiência do processo.

A segunda parte deste trabalho é composta pela metodologia, resultados obtidos, análises e conclusão.

### 3. Revisão Bibliográfica:

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. Para promover a separação é necessária a existência de dois fatores elétricos:<sup>(5)</sup>

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

Existem atualmente dois processos importantes no campo de processamento mineral que utilizam as propriedades elétricas. Esses são a separação eletrostática e a precipitação eletrostática. Separação eletrostática é usada para separar sólidos granulares com propriedades elétricas diferentes. A precipitação eletrostática é usada para remover partículas finas dispersas em gás: é uma separação sólido-gás com o objetivo principal de abater os sólidos e limpar o ar.

O processo de separação eletrostática tem aplicação muito restrita, ele só é feito via seca o que é sua principal restrição, pois qualquer presença de umidade prejudica a separação e um excesso dela provoca descarga elétrica para a atmosfera. A título de exemplo, no estado de Rondônia, só se trabalha em horário com menor umidade<sup>(9)</sup>.

Os primeiros equipamentos utilizados em escala industrial datam de 1800 e foram empregados na separação de ouro e sulfetos metálicos da ganga silicosa com baixa condutividade.<sup>(6)</sup>

Um corpo eletricamente carregado se colocado sob um campo elétrico, em um meio não condutor, sofre a ação de uma força elétrica. Esta força é produto entre a carga  $q$  e a intensidade do campo,  $E$ .

$$F = q \cdot E \quad [1]$$

Esta força pode ser de atração ou repulsão dependendo do sinal da carga.

Existe similaridade entre o comportamento de uma partícula em um campo elétrico e um campo magnético. Equações de repulsão e atração tem a mesma forma, uma oriunda de um polo negativo para um positivo no campo eletromagnético a força segue a seguinte equação:

$$F = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{(m \cdot m^*)}{d^2} \quad [2]$$

Onde,  $\mu$  é a permeabilidade magnética do meio,  $m^*$  e  $m$  são as forças dos polos, e  $d$  é a distância entre eles. Já na separação eletrostática a força de atração entre uma carga negativa  $e$  para uma positiva  $e^*$  é dada por:

$$F = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{(e \cdot e^*)}{d^2} \quad [3]$$

Na equação (3)  $\epsilon$  é a constante dielétrica, análoga a  $\mu$ . Mas as semelhanças param por aí, uma vez que podemos isolar polos quando tratamos de fenômenos elétricos, o que não ocorre com os fenômenos magnéticos.

A separação eletrostática é utilizada em um número limitado de materiais, mais comumente minerais. Esse método é utilizado quando as possibilidades de outras aplicações são pequenas, porém se provaram eficientes e ainda possuem um potencial não descoberto em aplicações em que métodos a úmido não são viáveis.

A separação eletrostática se baseia em dois métodos: eletroforese e dielectroforese. Sendo o segundo baseado em partículas tardiamente carregadas enquanto que no primeiro as partículas são inicialmente carregadas.

A separação por eletroforese requer um campo de alta intensidade, aliado a um bombardeamento de íons, na maioria dos casos.

Existem quatro métodos principais de carregar uma partícula:

- a) Causar atrito, ou seja, esfregar as partículas entre si;
- b) Esfregar o material com outra superfície;
- c) Por indução;
- d) Por bombardeamento de elétrons ou iônico;

Em relação aos equipamentos de separação eletrostática, existem basicamente três principais, o eletrodinâmico, os separadores triboelétricos

(baseados na carga por atrito), separadores de alta tensão e separadores de queda livre. A figura (1) apresenta esquemas dos quatro tipos de separadores eletrostáticos.

O mais utilizado é o separador de alta tensão. Esse maior uso é decorrente do seu melhor desempenho assim como maior conhecimento técnico sobre o seu funcionamento. O seu funcionamento é baseado em um rotor que conduz as partículas a um campo criado por um eletrodo ionizante, este é a parte do equipamento que faz o bombardeamento de elétrons. Todas as partículas são carregadas, entretanto as partículas condutoras perdem a carga para o rotor e são lançadas radialmente ao rotor por uma força centrífuga, enquanto que as não condutoras continuam carregadas e se movimentam em uma trajetória semelhante ao rotor. Neste caso as cargas das partículas não condutoras não foram perdidas e, por isso, continuam unidas ao rotor até a carga delas desaparecer lentamente.

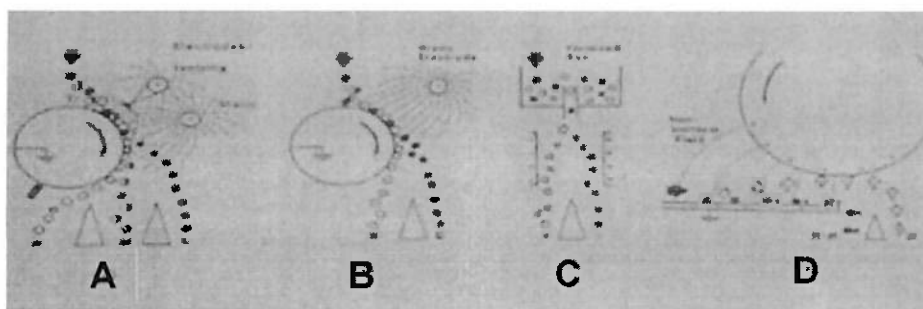


Figura 1: Quatro tipos básicos de separadores eletrostáticos.

### 3.1. Eletrização de Partículas

Os métodos de carregamento são eletrização por contato ou atrito, bombardeamento de elétrons (iônico) e por indução.

A boa eficiência da separação eletrostática dos minerais está relacionada à eficiência de como se eletrizam os minerais em questão. 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 liberados adequadamente, o que favorece a sua eletrização seletiva. Outros fatores a serem

considerados são o limite inferior da granulometria de liberação que deve ser da ordem de 20  $\mu\text{m}$ , a umidade do material tem que ser muito baixa, além do controle das condições laboratoriais externas como temperatura e umidade. Em tais condições deve haver uma quantidade mínima de massa, suficiente para que haja uma atração efetiva por parte da força elétrica aplicada.

### 3.1.1. Eletrização por contato ou atrito

Este processo de eletrização depende da natureza e também à forma das partículas envolvidas. Resultados satisfatórios são obtidos com operações repetidas, 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 chegar a uma densidade elevada de carga superficial, o que favorece à separação.

Existem dois aspectos aos quais se deve ter atenção 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 após interrompido o contato entre eles, fenômeno ainda sem explicação. <sup>(5)</sup> Na verdade, pouco se sabe como controlar ou quantificar a carga elétrica remanescente 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. A modelagem desse método é, portanto, complicada, uma vez que em um projeto mineral se lida com jazidas de minérios com diferentes características, com peculiaridades e diferenças para um mesmo bem mineral em diferentes jazidas.

### 3.1.2. Eletrização por bombardeamento iônico

Os gases, em condições normais de temperatura e pressão, não conduzem corrente elétrica e se comportam como dielétricos. Por outro lado, se submetido 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 prática ocorre um fluxo iônico entre os eletrodos de pequenas dimensões. Os melhores resultados são obtidos usando-se eletrodo fabricado com fio de tungstênio e diâmetro da ordem de 0,25 mm.<sup>(5)</sup> 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. 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 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.<sup>(7,8)</sup>

O procedimento prático consiste em fazer passar as partículas a serem carregadas através da região do espaço onde está situado o fluxo iônico. 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. A força que mantém as não condutoras coladas à superfície é chamada de "força de imagem".<sup>(2)</sup>

### 3.1.3. 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 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. 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. Já as não condutoras sofrem apenas polarização, conforme mostrado na Figura 2. Elas ficam então aderidas à superfície como consequência da atração eletrostática.

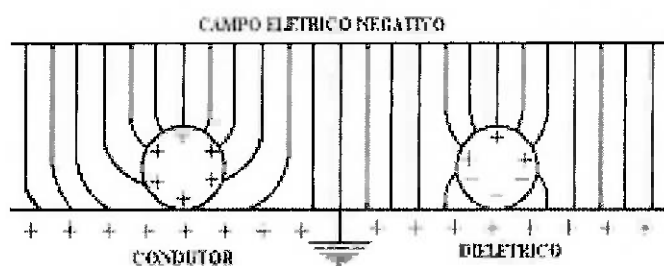


Figura 2: Diagrama representativo de duas partículas após o carregamento por indução

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

### 3.2. Condutividade

Diferença na condutividade entre os componentes em uma mistura de partículas são usualmente um pré-requisito essencial para uma separação bem sucedida.

Todos os materiais apresentam diferenças de condutividade, têm-se então três categorias principais: condutores, semicondutores e não condutores. Não existe uma linha de corte entre as categorias, entretanto materiais com condutividade maior que  $10^5$  S/m e não condutores tem condutividade menos que  $10^{-8}$  S/m. Dados sobre condutividades de minerais são apresentados na Tabela 1

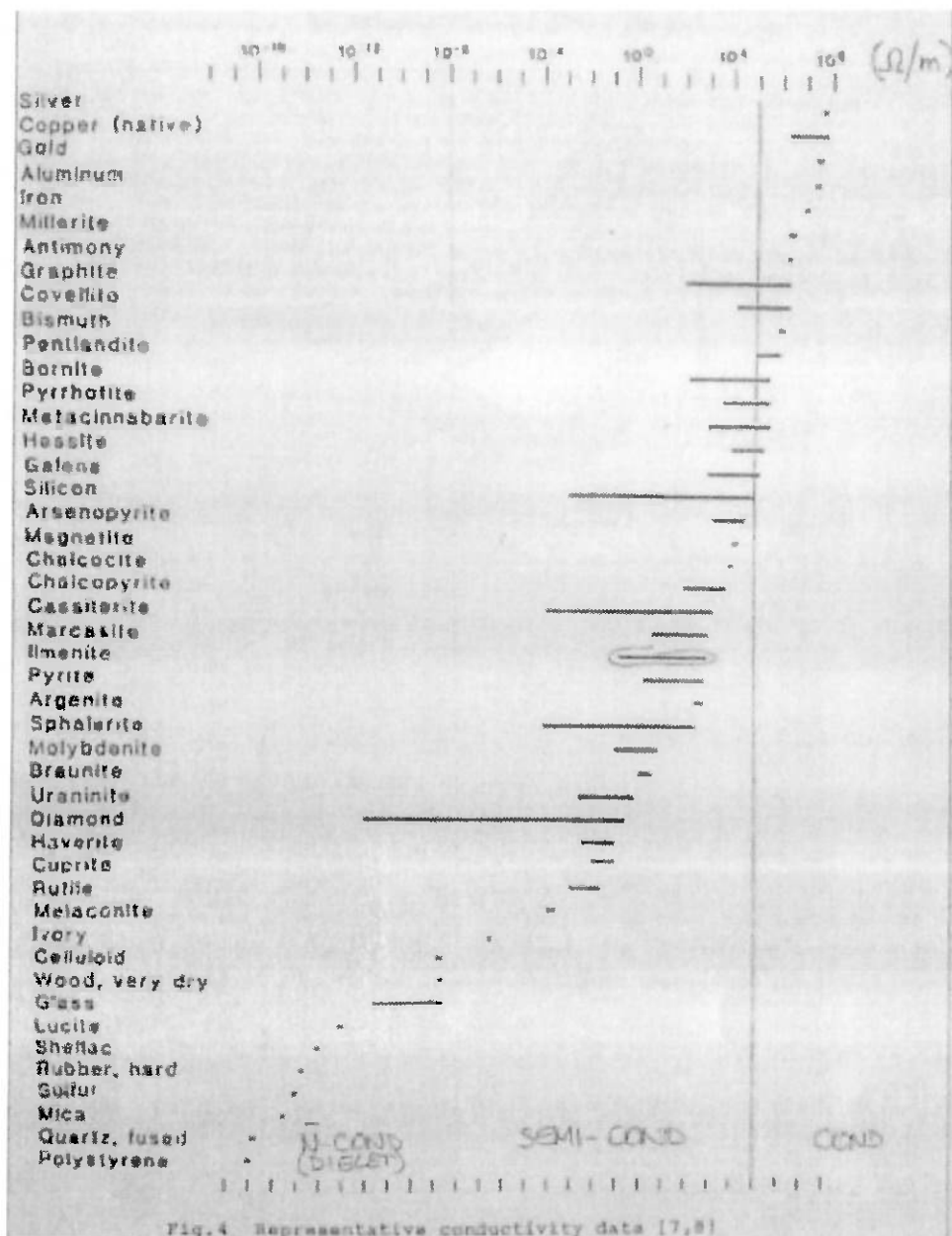


Tabela 1: Condutividade dos minerais

### 3.3. Teoria da Banda.

Os átomos se combinam para formar moléculas, os átomos carregados eletricamente, então, começam a interagir. O princípio da exclusão previne que os elétrons tenham mesmos níveis de energia, necessitando que os elétrons originais se tornem *bands* que essencialmente podem ser consideradas como *quasi*-contínuo de um nível de energia discreta (figura 3).

Enquanto os elétrons das camadas mais internas estão travados por causa da atração e interações com outros átomos, os elétrons da camada de valência podem sofrer essa sobreposição. Em vários casos é possível reconhecer a existência de uma banda de valência e um nível superior da banda de condução (Figura 3), a banda de condução só ocorre entre elementos na faixa central da Tabela de Mendeleev, que tem disponibilidade de elétrons na camada externa, ou seja, existem gaps de energia entre as *bands* em um material.

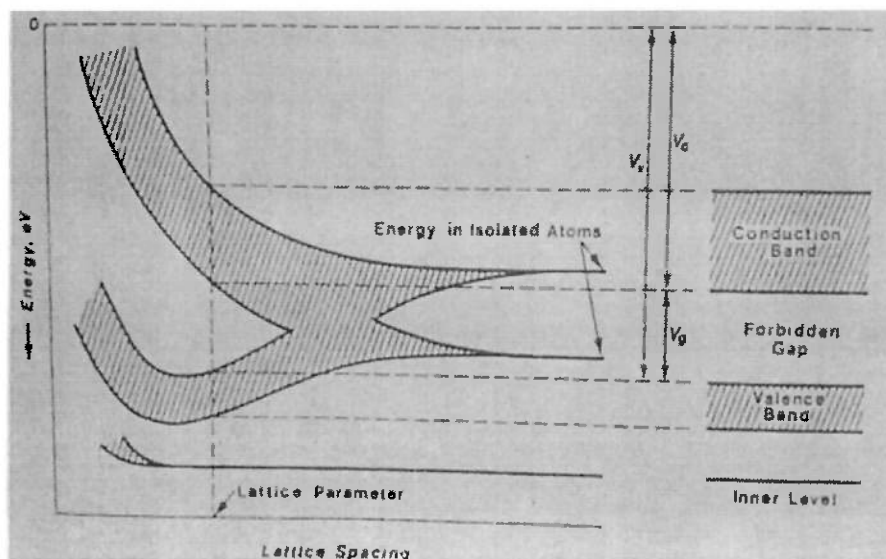


Figura 3: Energia por banda de condução

Os diagramas de energia mostrados (Figura 3) representam os três tipos de condução. Duas situações podem levar a um condutor, com a banda de valência parcialmente completa (Figura 4.a), provendo a condução, ou com a banda de Valência sobrepondo (Figura 4.b).

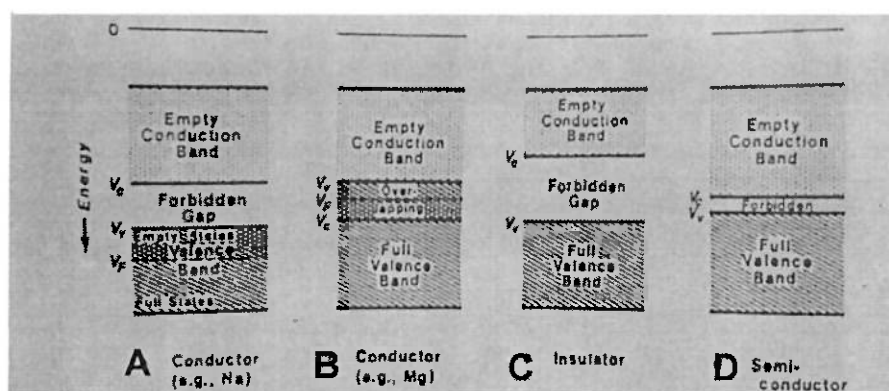


Figura 4: Diagramas de energia

Nos isolantes a banda de valência é completa (figura 4.c), e os elétrons formam ligações muito fortes, o que dificulta a quebra entre átomos vizinhos. O *gap* “esquecido” é grande e a energia térmica ou um campo elétrico é usualmente insuficiente para elevar o elétron superior na banda de valência para a banda de condução.

### 3.4. Funcionamento dos Separados Eletrostáticos.

Uma primeira etapa para entendimento da separação eletrostática é a observação do comportamento das partículas dentro do equipamento. A figura 5 apresenta um esboço de um separador eletrostático que facilita tal entendimento.

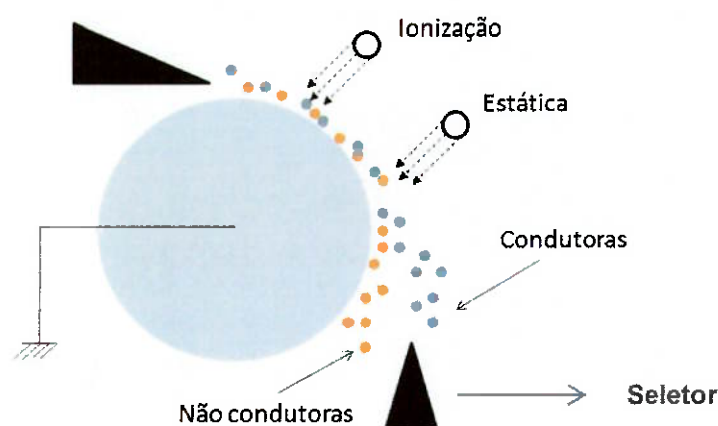


Figura 5: Esboço de um separador eletrostático.

O princípio na permanência da partícula no rotor depende da característica da partícula, se condutora ou não, sendo que além desses dois fatores há dependência da intensidade do campo.

As partículas sofrem inicialmente um carregamento elétrico e são carregadas. As partículas se comportam diferentemente de acordo com suas propriedades, se condutora ou não, e em seguida são separadas em um processo que será posteriormente descrito. Na parte inferior do equipamento onde os seletores são colocados há duas possibilidades de dispor esses equipamentos. Para uma separação mais superficial se coloca somente um seletor, entretanto na maioria dos casos são

colocados dois seletores, com a finalidade de se recolher três grupos de partículas, as condutoras, não condutoras e as mistas, sendo esse último grupo composto por partículas que não foram totalmente liberadas, ou que se misturam devido à falta de seletividade do equipamento/processo.

### 3.5. Diferenciação das partículas

A Figura 5 apresenta um gráfico da perda de carga superficial em função do tempo.

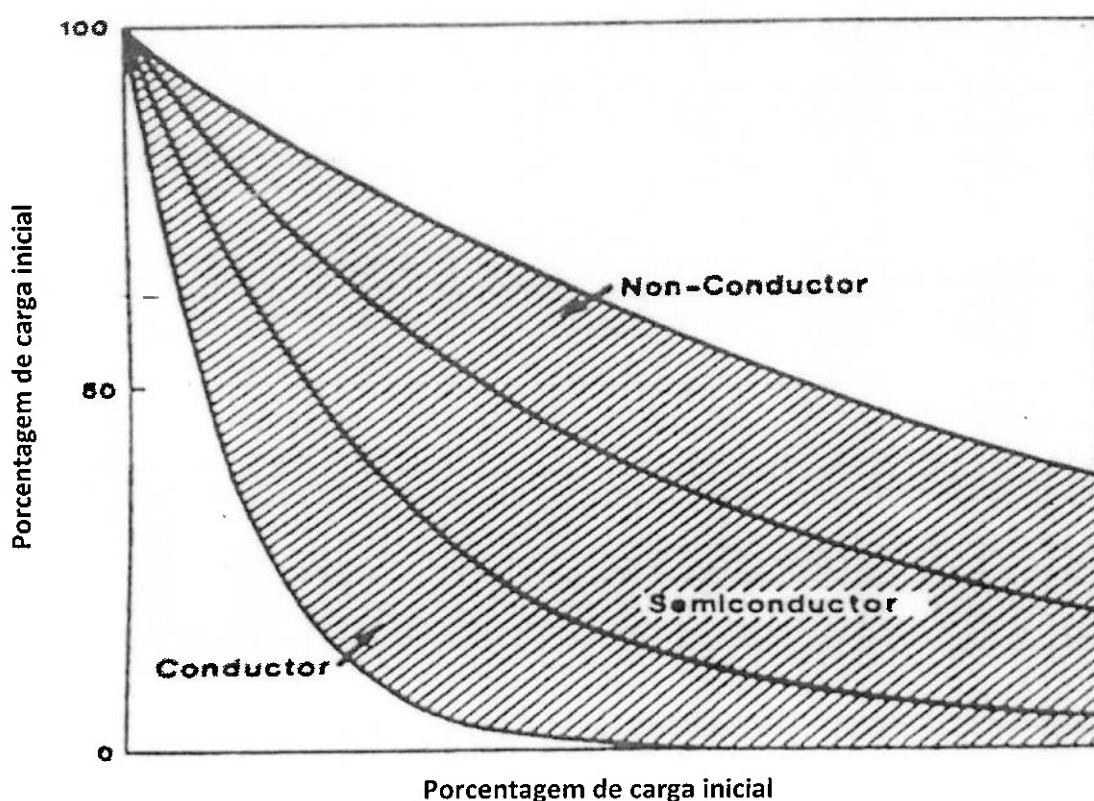


Figura 6: Perda de carga em função do tempo.

Para um determinado intervalo de tempo, partículas condutoras perdem parcela relativamente maior de carga em relação às semicondutoras e estas em relação às não condutoras.

### 3.6. Sequência da passagem da partícula

A interação da partícula com o equipamento é descrita através do diagrama da Figura 9.

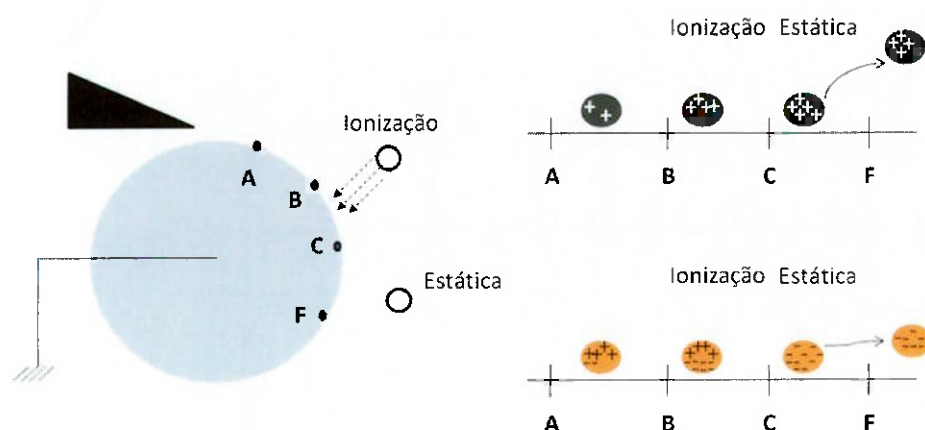


Figura 7: Sequencia da partícula em separador eletrostático.

O sequenciamento da partícula é dividido em quatro partes, AB é o trecho imediatamente anterior ao bombardeamento de raios catódicos, o trecho BC é onde ocorre o carregamento, CF é o trecho imediatamente após o bombardeamento de raios catódicos e, por fim, após F é onde ocorre literalmente a separação.

## Trecho AB

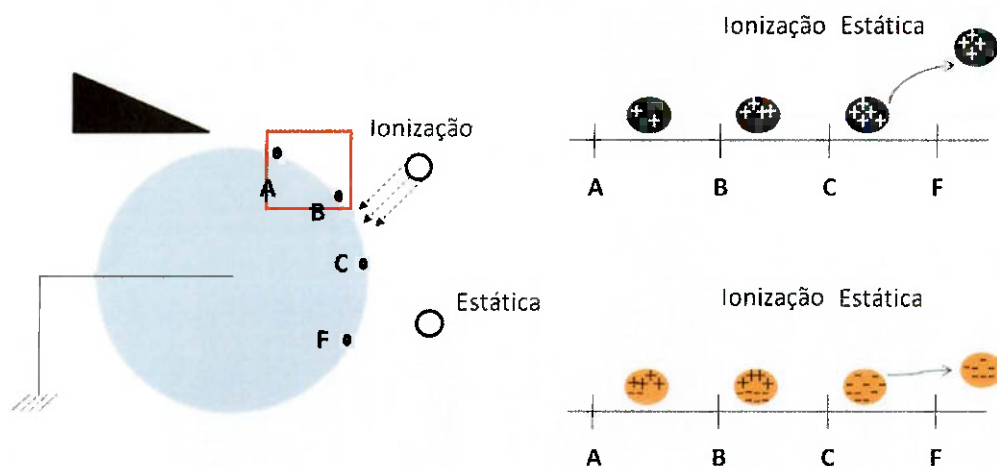


Figura 8: Trecho AB.

No trecho AB mostrado Figura B, as partículas atingem o rotor. Nesse momento as partículas condutoras e não-condutoras ainda não receberam as cargas.

## Trecho BC

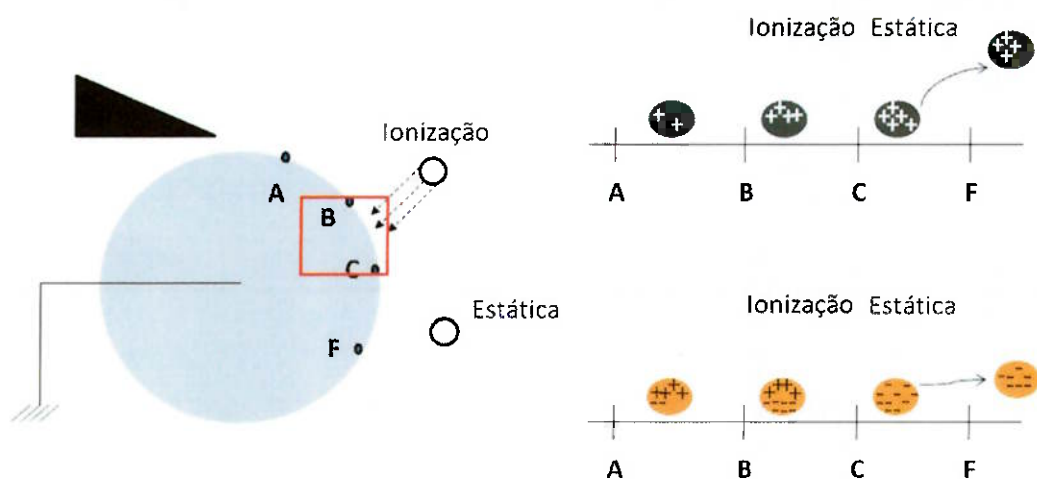


Figura 9: Trecho BC

Depois de sofrer a incidência dos raios catódicos (partículas negativas), nas partículas condutoras há uma migração das cargas positivas para o lado de incidência dos raios e nas partículas não condutoras as cargas negativas migram para o lado oposto, como mostrado na figura.

No próximo trecho a diferença de propriedade das partículas determinará a intensidade da perda de carga das menores.

Trecho CF

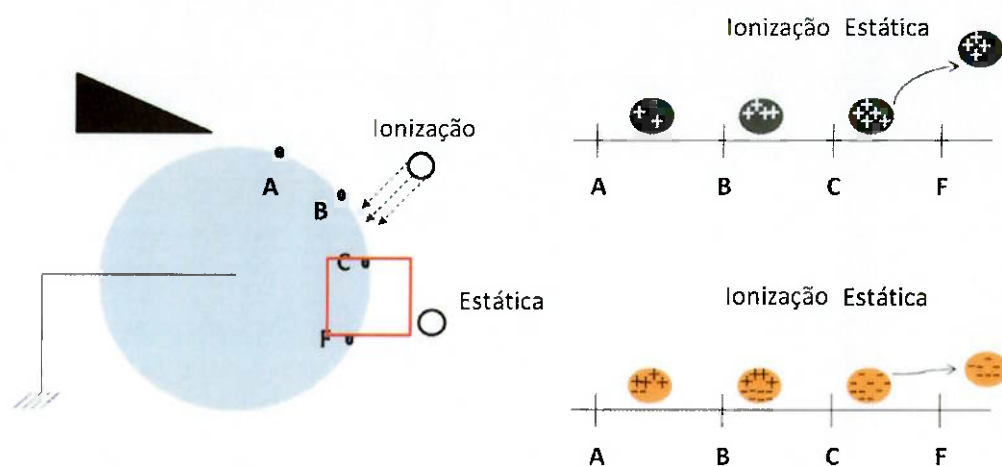


Figura 10: Trecho CF

Nessa etapa há perda de carga por parte das partículas condutoras, dessa maneira elas são atraídas do rotor

### Trecho F(Final)

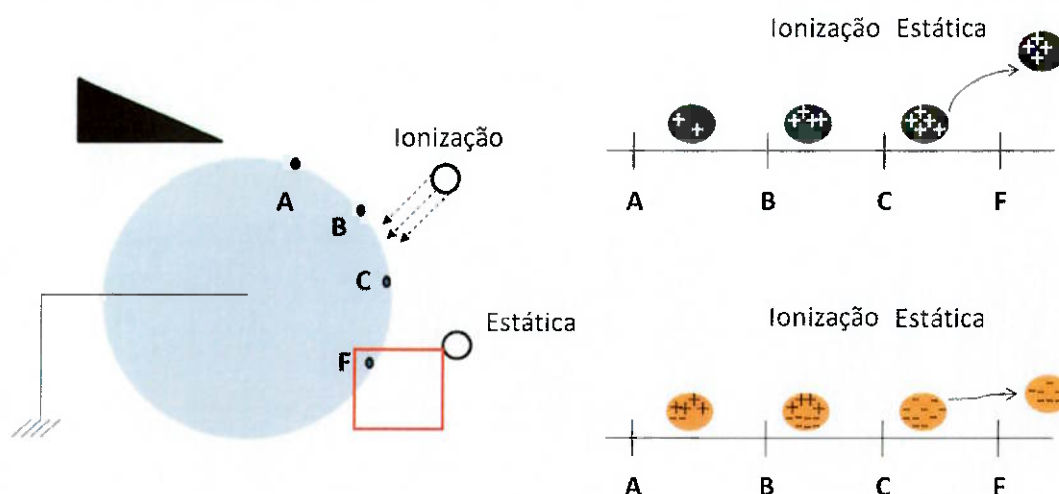


Figura 11: Trecho Final (F)

Nessa etapa as partículas condutoras são lançadas por força centrífuga radialmente ao rotor. Nota-se que as partículas condutoras são lançadas a um ângulo maior.

A presença de frações semicondutoras determina que seja empregada uma nova etapa de separação, tratando-as como partículas mistas.

Todos os detalhes da separação são função da sequência da passagem da partícula pelo separador e seus diversos trechos.

### 3.7. Efeitos que causam desvios de desempenho

O entendimento de alguns tipos de efeitos, externos ou internos, é de fundamental importância para o entendimento de desvios de desempenho do processo.

### 3.7.1. Efeito da umidade

O primeiro uso do controle da umidade nesse tipo de processo que se tem notícia data de 1915, registrado em uma mina de carvão, uma vez que a condutividade aumenta com subsequente adsorção da umidade na superfície.

Existem dois efeitos diferentes da umidade no processo de separação eletrostática. O primeiro é o efeito da umidade atmosférica que condiciona a temperatura do teste como mostra a Tabela 2. A indução de cargas entre partículas é afetada pela umidade podendo alterar o resultado do processo. O segundo é o efeito da umidade da própria partícula. Alguns exemplos mostram abaixo o efeito da umidade em alguns casos práticos

Umidade	Temperatura Requerida
35%	20º
60%	60º
90%	90º

Tabela 2: Efeito da Umidade na temperatura do teste

A umidade influencia o contato superficial das partículas, conforme demonstrado por ensaios conduzidos com quartzo e feldspato. Com umidade relativa do ar de até 20%, foi obtida uma separação satisfatória. Na passagem sobre uma placa vibratória de alumínio, partículas de quartzo e feldspato foram carregadas eletricamente com carga negativa. Com o aumento da umidade o feldspato ficou carregado positivamente com o quartzo permanecendo negativo. Com o aumento de umidade o quartzo também se tornou positivo. <sup>(2)</sup>

A suscetibilidade à umidade de alguns minerais é muito alta, como exemplo o aumento de umidade na fluorita e na esfarelita a não há interferência na separação, pois ambas podem ser separadas mesmo com uma umidade alta. O efeito da umidade é potencializado quando existe uma condutividade grande na superfície.

A suscetibilidade à umidade também varia quando se objetiva separar minerais de condutividade diferentes. Na separação de bons condutores, como cromita e magnetita de quartzo é necessária umidade muito baixa, obtida com o simples

aquecimento da amostra. No processo contrário, de resfriamento, o quartzo funciona como um condutor na separação, causando problemas na eficiência do processo.

O pré-condicionamento da amostra com alguns reagentes, como cloridrato de octil-amina, tornam alguns minerais que são mais suscetíveis à umidade menos suscetíveis a esse efeito.

### 3.7.2. Efeitos da Temperatura

As diferenças de condutividade elétrica, potencial de contato e constante dielétrica podem variar de acordo com mudanças de temperatura.

Nos condutores metálicos existe uma diminuição na condutividade conforme aumenta a temperatura. Desde que a condutividade de alguns semicondutores tenda a zero quando a temperatura é reduzida, muitos não condutores vão se tornar condutores enquanto houver um aumento da temperatura.

A Tabela 3 mostra a separação (em %) de condutores sob o efeito de várias temperaturas.

Mineral	Source	Color	Separation as conductors at various temperatures (°C), percent						
			50°	100°	200°	300°	400°	500°	600°
Linumite ?	Lexington County, S.C.	Brown			8	57	92		
Do ?	Bolton, Canada	do.			3	15	27	38	66
Magnetite	Stevens County, Wash.	Light gray					<1	4	54
Magnetite	Los Angeles County, Calif.	Black	99						
Microcline	Keystone, S. Dak.	White					<6	41	84
Muscovite	Bahia, Brazil	Yellow	9	10		15	19	20	15
Muscovite	Tsumeb, South-West Africa	Gray	20	29	77	96			
Nepheline	Bancroft, Ontario	White			9	22	27	56	73
Nepheline	Magnet Cove, Ark.	Black	99						
Orthoclase	Jackson County, N.C.	Light green						16	68
Pedernite	Byrd School, Pa.	Red			<1	15	60	80	90

Tabela 3: Diferenças na separação em relação a temperatura.

### 3.7.3. Efeito de Impurezas

A condutividade dos semicondutores é altamente sensível à presença de impurezas. Uma pequena mudança na quantidade de impurezas frequentemente

causa mudanças na condutividade. Semicondutores que têm um excesso estequiométrico de cátions são chamados de tipo eletrônico. Aqueles que têm excesso de ânions são chamados de *positive-hole type*. Um doador, aquele com excesso de cátions, tem uma tendência maior a ceder elétrons do que o receptor.

O aumento da temperatura favorece a difusão, sendo assim certas impurezas serão eliminadas preservando as propriedades do material e tornando o processo de separação e diferenciação de propriedades mais eficiente.

### 3.8. Granulometria

A granulometria é uma restrição do processo. Por causa do desprendimento da poeira e arraste mecânico, o tamanho da partícula deve ser controlado na alimentação do equipamento.

Partículas 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 presença de material grosso e condutor na fração não condutora, diminuindo a eficiência do processo. 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

*Carta et al*<sup>(1)</sup> descobriu que a granulometria de alimentação do ensaio é dependente do material em questão e da sua densidade. Para mostrar isso foram usados dois intervalos de tamanho de partícula diferentes,  $-0,85 + 0,212$  mm e  $-0,212 + 0,075$  mm, em ensaio com minerais sulfetados e com galena. Para o mineral sulfetado foi visto que a melhor separação ocorria com uma mistura dos dois intervalos de tamanho, enquanto que na galena o melhor intervalo de separação ocorria apenas em uma faixa, assim a qualidade e eficiência da separação ocorrem de acordo com as características do material, uma vez que ambas as gangas são não condutoras, enquanto o minério sulfetado é não condutor e menos denso, já a galena é semicondutora e mais densa.

No que se refere ao tamanho da partícula deve-se considerar também o equipamento utilizado, como por exemplo, o separador em queda livre e o separador a jato de pó. Esses separadores requerem uma eletrização por contato e dependem da trajetória desde o ponto inicial.

Quando se fala do equipamento padrão onde há o bombardeamento de elétrons é necessário um controle, uma vez que as partícula grosseiras podem demorar mais para perder a carga para o rotor no caso da partícula condutora, ou ainda a partícula não vai adquirir carga suficiente para diferencia-la caso a partícula seja não condutora.

### 3.9. Descrição do equipamento

Os separadores eletrostáticos são classificados em dois tipos principais, eletrodinâmicos ou rolo de alta tensão e placa eletrostática (separador de tela). Ambos trabalham de maneira semelhante, porém com forças diferentes aplicadas sobre a partícula, gravidade ou forças de atração eletrostática. A dinâmica de ação de cada tipo é descrita abaixo.

No separador de rolos, a partícula é carregada por uma carga de íons. A partícula condutora perde sua carga para o rolo e é removida por força centrífuga. Os rolos são normalmente utilizados para fluxos de partículas que têm condutores grossos e não-condutores finos

Na placa eletrostática os condutores perdem elétrons para a placa (ânodo) e são jogados para fora. São usados para partículas em uma faixa de tamanho de  $-0,25$  mm e  $+ 0,075$  mm para uma separação eficiente. As partículas precisam estar secas e ter uma distribuição de tamanho próxima para que a modelagem de trajetória de partícula seja eficaz. Esse separador é mais utilizado para separar minerais arenosos, como zircônita, rutilo, ilmenita que são separados da sílica (ganga).

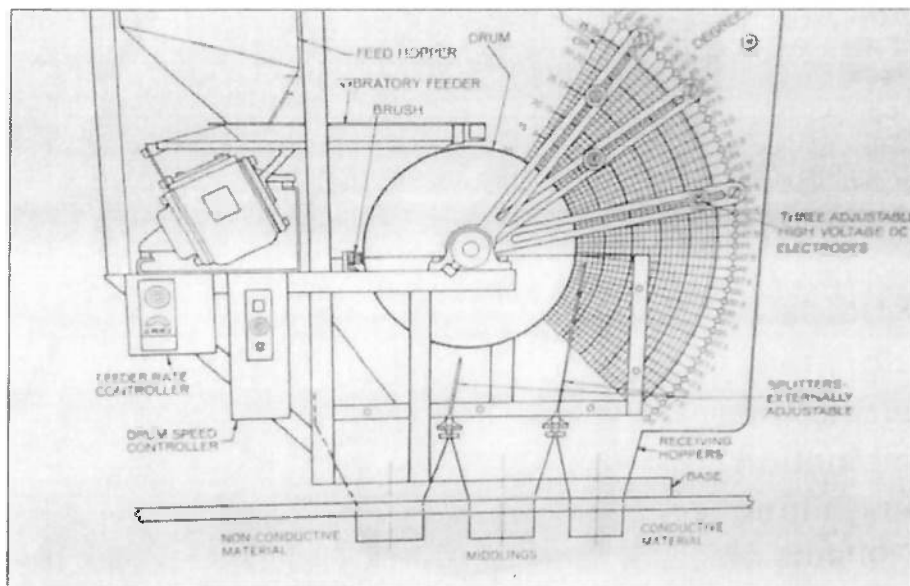


Figura 12: Exemplo de separador eletrostático.

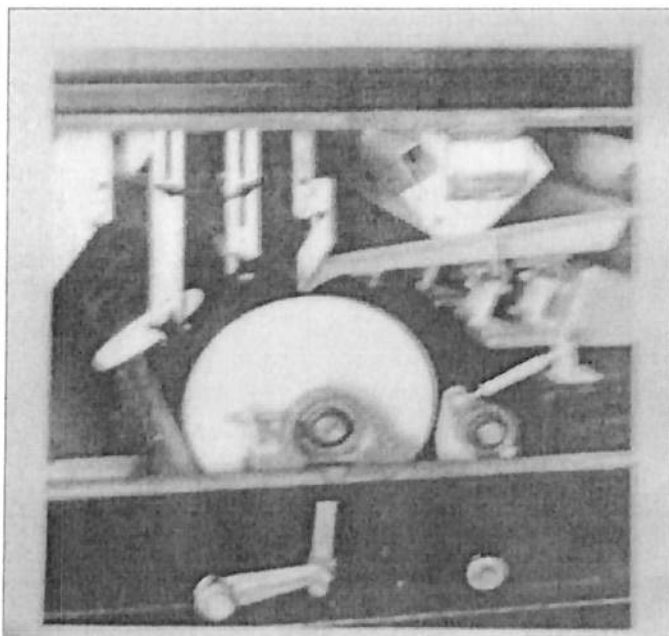


Figura 13: Exemplo de separador eletrostático (2)

A Figura 12 mostra um esquema do separador eletrostático e se percebe com nitidez a presença de três compartimentos que acumulam os diferentes tipos de partícula, não condutoras, mistas e condutoras. A Figura 13 contém um exemplo de separador usado na indústria.

### 3.10. 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;
- Remoção do cobre presente em resíduos industriais reaproveitáveis;
- Purificação dos gases em chaminés industriais, por meio de precipitação eletrostática.
- Reciclagem de peças de computadores e processadores.

## 4. Metodologia

### 4.1. Cominuição

A amostra selecionada de minério de ferro com massa de 14,7 kg foi britado, inicialmente em um britador de mandíbulas de escala laboratorial e processado em seguida em um britador de rolos, resultando em tamanho menor que 1,18 mm.

Em seguida foi feita uma pilha de homogeneização alongada e retirado por quarteamento 1,592 kg, além de outra alíquota de 50g e encaminhada para análise química.

### 4.2. Peneiramento

Após secagem a 100° foi realizado peneiramento da amostra utilizando-se as seguintes malhas: 1,18; 0,59; 0,30; 0,106 mm. As faixas de interesse para o trabalho foram -0,59 +0,30 mm e -0,30 + 0,106 mm.

A Tabela 4 apresenta a quantidade de massa, em gramas, em cada malha e quanto de cada foi quarteada e quanto foi levada à análise química.

Malhas (mm)	Massa (g)	Quarteamento			Análise Química
1,18	-				
0,59	5.245,4	506,2	505,7	504,4	54,1
0,3	2.825,4	506,6	501,7	504,4	54,2
0,106	1.982,7	501,6	504,7	501,4	51,9
- 0,106	2.988,6	501,4	505,3	500,8	51,8
	13.042,1				

Tabela 4: Dados de massa quarteada para ser encaminhada a análise química.

#### 4.3. Concentração

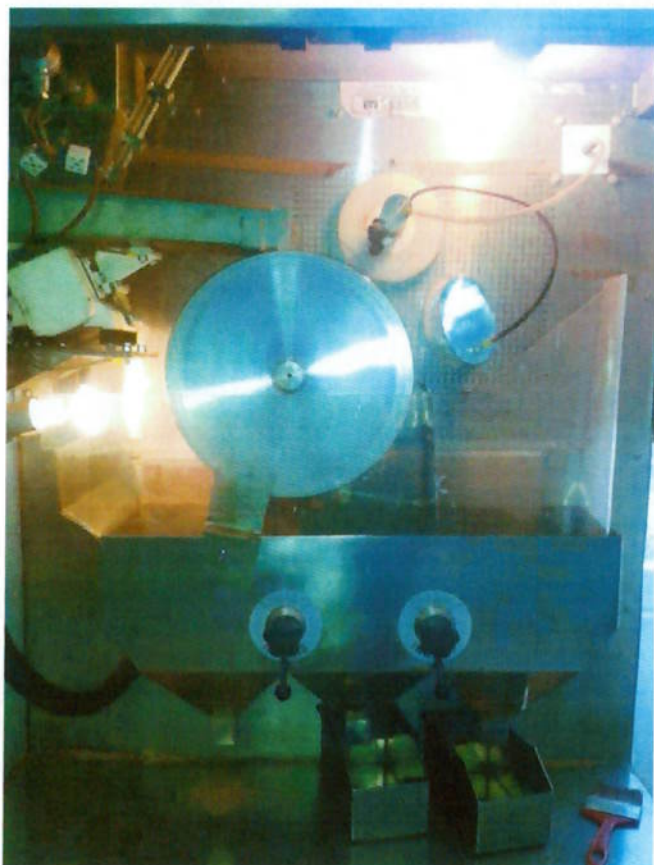
O minério de Ferro foi inicialmente submetido a uma separação magnética para retirada do material ferromagnético em um separador de rolos com 12000 Gauss, sob 200 rpm. Foram utilizadas duas amostras nesse processo, a primeira na faixa de  $- 0,59 + 0,30$  mm e a segunda amostra na faixa de  $- 0,30 + 0,106$  mm. O equipamento mostrado na Figura 14 foi o utilizado para realizar o ensaio de separação magnética.



Figura 14: Separador magnético de rolos

A concentração prévia por separação magnética foi necessária uma vez que o bombardeamento iônico sobre um material predominantemente ferromagnético poderia causar a ocorrência de arcos, isso seria prejudicial ao experimento e ao operador do equipamento.

Em seguida os concentrados não magnéticos, nas duas faixas granulométricas, foram submetidos a secagem a 100° e posteriormente submetidos a separação eletrostática, realizada no equipamento mostrado na Figura 15, onde se vê um separador de laboratório, chamado Separador de escala irradiante, com voltagem 30 kV e rotação de 100 rpm. Os ajustes das variáveis de processo foram efetuados por técnicos da Inbras, empresa onde foram realizados os ensaios.



**Figura 15: Separador eletrostático (Fonte: Inbrás)**

Os separadores de eletrodo irradiante caracterizam-se pelos seguintes aspectos:

- Alta capacidade, quando se fala de separação eletrostática, o que significa 2.700 (kg/h)/m;

- Tensão elevada, até 40 kV, em corrente contínua;
- Baixa amperagem, de 0,5 a 1mA por eletrodo.

#### 4.4. Análises Químicas

Os teores determinados e apresentados em análise química foram determinados por análise sem padrões (*standardless*) dos elementos químicos detectados, de flúor a urânio, em espectrômetro por fluorescência de raios X Axios Advanced, marca PANalytical. Perda ao fogo (PF) efetuada a 1050 graus Celsius por 1h.

### 5. Resultados

#### 5.1. Resultados Obtidos

As tabelas 5, 6 e 7 apresentam, na sequência, os resultados obtidos.

Resultado da Análise Química e as Massas Correspondentes						
Amostra		Massa (g)	Fe (%)	Massa Fe (g)	SiO <sub>2</sub> (%)	Massa SiO <sub>2</sub> (g)
-0,3 + 0,106 mm	Magnético	398,0	46,0	183,1	33,0	131,3
-0,59 + 0,3 mm		405,0	40,3	163,2	41,6	168,5
-0,3 + 0,106 mm	Não Magnético	108,0	7,4	8,0	91,2	98,5
-0,59 + 0,3 mm		94,6	21,3	20,1	69,2	65,5
-0,3 + 0,106 mm	Teor Cabeça	506,0	37,8	191,1	45,4	229,8
-0,59 + 0,3 mm		499,6	36,7	183,4	46,8	233,9

Tabela 5: Resultado da análise química e massa das amostras.

Amostras	Balanço de Massa				
	-0,59 + 0,3 mm				
	Massa	Teor (%Fe)	Massa Fe	Teor (%Si)	Massa Si
Não Magnético	94,6	21,3	20,1	69,2	65,5
Não Condutor	60,3	12,9	7,8	81,3	49,0
Misto	13,0	25,0	3,3	63,9	8,3
Condutor	21,3	42,3	9,0	38,2	8,1
Magnético	405,0	40,3	163,2	41,6	168,5
Total	499,6		183,4		233,9

Tabela 6: Balanço de massa da fração ( -0,59 +0,30 mm)

Amostras	-0,3 + 0,106 mm				
	Massa	Teor (%Fe)	Massa Fe	Teor (%SiO <sub>2</sub> )	Massa SiO <sub>2</sub>
<b>Não Magnético</b>	<b>108,0</b>	<b>7,4</b>	<b>8,0</b>	<b>91,2</b>	<b>98,5</b>
Não Condutor	89,0	6,6	5,8	89,7	79,8
Misto	11,0	9,3	1,0	85,0	9,4
Condutor	11,0	10,0	1,1	84,4	9,3
<b>Magnético</b>	<b>398,0</b>	<b>46,0</b>	<b>183,1</b>	<b>33,0</b>	<b>131,3</b>
<b>Total</b>	<b>506,0</b>		<b>191,1</b>		<b>229,8</b>

Tabela 7: Balanço de massa da fração -0,30 +0,106 mm.

## 5.2. Análise dos dados

As análises dos resultados foram efetuadas com base em balanços mássicos e metalúrgicos elaborados para cada uma das separações realizadas, para cada uma das frações granulométricas consideradas.

A Figura 16 apresenta o balanço global das etapas de separação magnética e eletrostática para a fração 0,59 – 0,30 mm. Já a Figura 17 apresenta o mesmo tipo de balanço, porém tendo por referência apenas o ensaio de separação eletrostática conduzido com a mesma fração.

Analogamente, a Figura 18 apresenta o balanço global das etapas de separação magnética e eletrostática para a fração – 0,30 + 0,106 mm. Já a Figura 19 apresenta o mesmo tipo de balanço, porém tendo por referência apenas o ensaio de separação eletrostática conduzido com a mesma fração.

Para efeito de comparativo de desempenho foi empregado, além das recuperações mássicas e metalúrgicas, enriquecimento e um índice de seletividade, denominado Índice de Gaudin modificado, assim definido:

$$IGM = \sqrt{\frac{\text{teor Fe conc} \times \text{teor SiO}_2 \text{ rej}}{\text{teor Fe rej} \times \text{teor SiO}_2 \text{ conc}}} \quad [4]$$

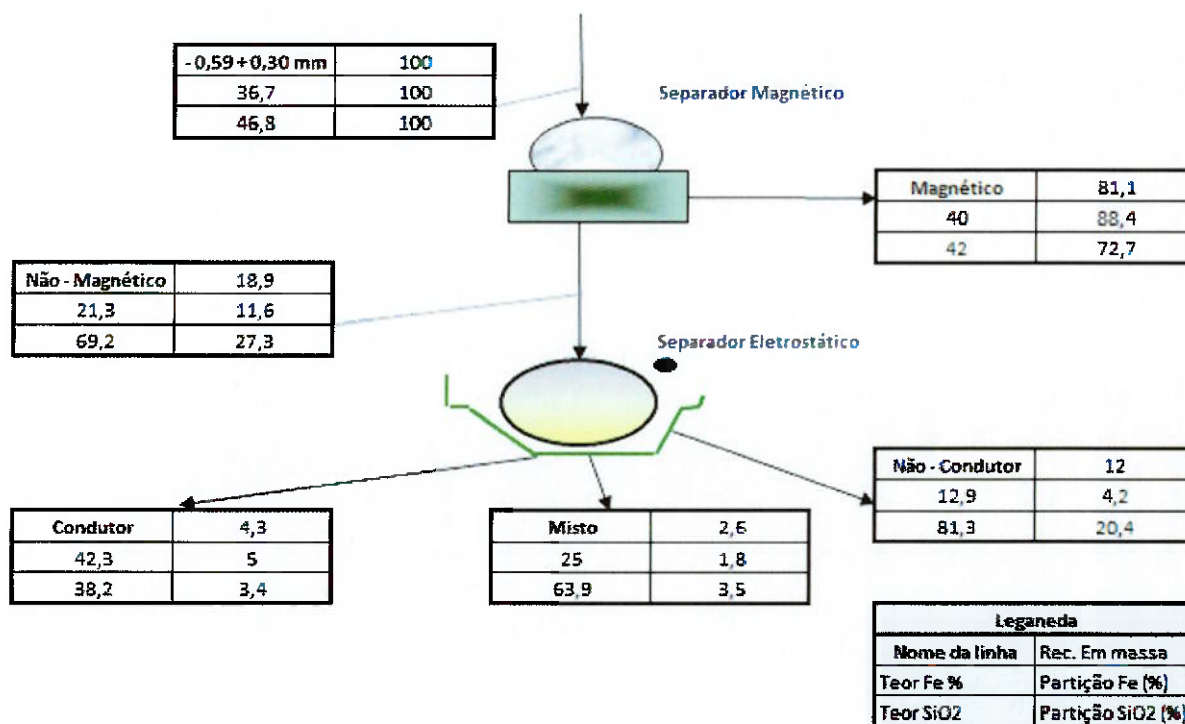


Figura 16: Balanço mássico e metalúrgico das separações magnética e eletrostática -- Fração - 0,59 + 0,30 mm

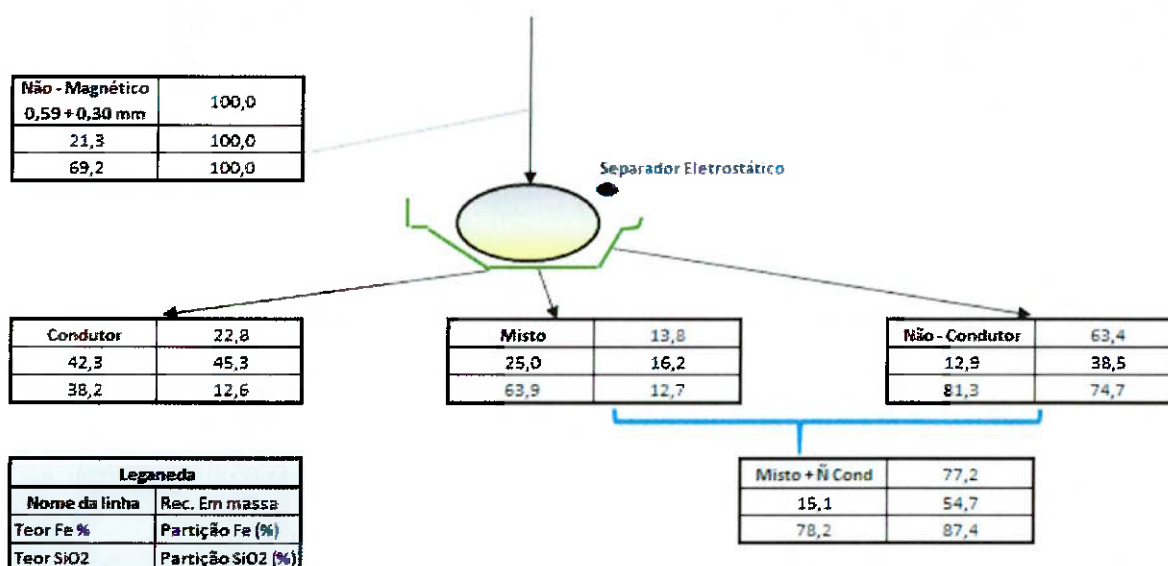


Figura 17: Balanço mássico e metalúrgico da separação eletrostática -- Fração - 0,59 + 0,30 mm

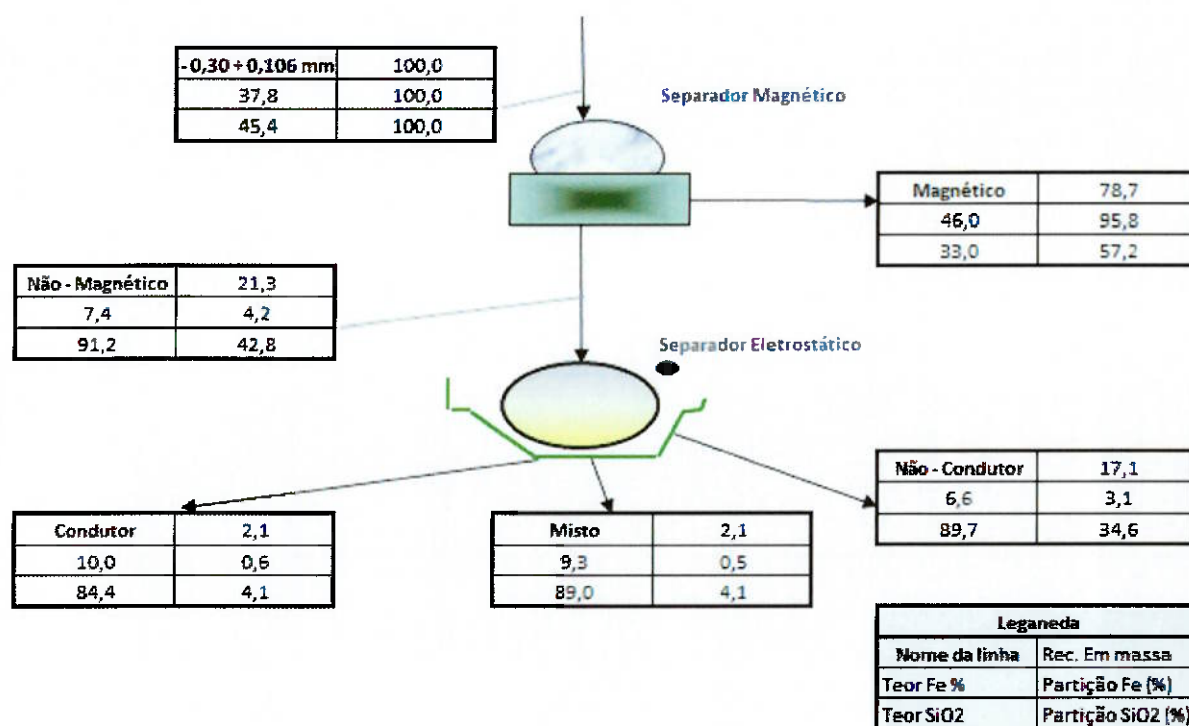


Figura 18: Balanço mássico e metalúrgico das separações magnéticas e eletrostáticas --  $-0,30 + 0,106$  mm

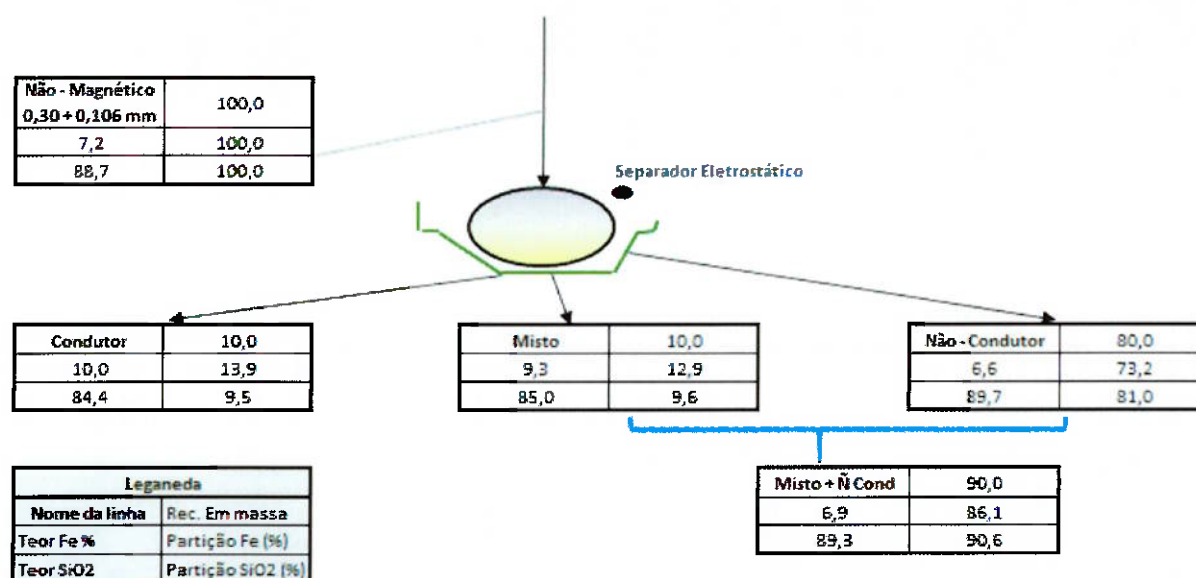


Figura 19: Balanço mássico e metalúrgico da separação eletrostática -- Fração  $-0,30 + 0,106$  mm

A tabela 8 apresenta o sumário dos desempenhos da separações magnéticas e eletrostáticas para a fração -0,59 +0,30 mm.

Etapa (- 0,59 + 0,30 mm)	Desempenho na Etapa			Índice de Gaudin Modificado
	Recueração Mássica (%)	Recuperação Metalúrgica de Fe (%)	Enriquecimento em Fe	
Sep. Magnética	81,1	88,4	1,11	1,76
Sep. Eletrostática	22,8	45,3	1,99	2,39

Tabela 8: Índices de desempenho das separações magnéticas e eletrostáticas -- Fração -0,59 +0,30 mm

Nota-se na Tabela 8 que, embora a recuperação mássica fosse elevada na etapa de separação magnética, a recuperação metalúrgica de Fe também o foi, resultando, assim, em baixo enriquecimento, além de baixa seletividade do processo, esta última calculada pelo índice Gaudin Modificado – IGM.

A mesma Tabela 8 indica que para a separação eletrostática, a recuperação metalúrgica de Fe foi significativamente mais elevada do que a recuperação mássica, resultando em enriquecimento de praticamente 2,0, além de IGM de 2,39.

É interessante observar que o concentrado da separação eletrostática (condutores) apresentam teor semelhante ao concentrado da separação magnética, respectivamente 42,3% e 40,0% de Fe. Neste caso, portanto, a separação eletrostática contribuiu para o aumento de recuperação mássica e metalúrgica do processo de concentração.

A Tabela 9 apresenta o sumário dos desempenhos da separação magnética e eletrostática para a fração -0,30 +0,106 mm.

Etapa (- 0,30 + 0,106 mm)	Desempenho na Etapa			Índice de Gaudin Modificado
	Recueração Mássica (%)	Recuperação Metalúrgica de Fe (%)	Enriquecimento em Fe	
Sep. Magnética	78,7	95,8	1,22	4,24
Sep. Eletrostática	10,0	13,9	1,39	1,24

Tabela 9: Índices de desempenho das separações magnéticas e eletrostáticas -- Fração -0,59 +0,30 mm

A tabela 9 indica que no caso da fração  $-0,30 +0,106$  a etapa de separação magnética apresentou desempenho elevado no que se refere à recuperação metalúrgica do Fe, neste caso 95,8% para o concentrado. A seletividade pelo IGM resultou em 4,14, portanto o mais alto verificado nesse trabalho.

Como resultado do desempenho elevado da separação magnética, a separação eletrostática foi alimentada com fração contendo 7,2% de Fe, valor este muito inferior, por exemplo, aos 21,3% verificado para a fração  $-0,59 +0,30$  mm. O resultado foi, portanto, um pequeno enriquecimento em Fe na fração de condutores (concentrado) da separação eletrostática.

Neste caso o teor de Fe do concentrado da separação eletrostática foi muito inferior (10%) ao teor do concentrado de separação magnética (46%).

## 6. Conclusão

A combinação de separação eletrostática e separação magnética indicou desempenho elevado para a fração granulométrica  $-0,59 + 0,30$  mm do minério de ferro selecionado. Neste caso, a inclusão de uma etapa de separação eletrostática resultou em enriquecimento e seletividade elevadas para processamento do rejeito da separação magnética. Como o concentrado obtido (condutor) apresentou teor semelhante ao do concentrado da separação magnética, a etapa de separação eletrostática em elevação tanto da separação mássica quanto da da recuperação metalúrgica do concentrado final.

O desempenho da fração  $-0,30 + 0,106$  mm no mesmo processo foi bastante diferente. Neste caso a separação magnética apresentou desempenho muito elevado, resultando em rejeito (alimentação da separação eletrostática) com teor muito baixo (7,2%). O enriquecimento obtido na separação eletrostática não foi suficiente para obter concentrado que pudesse ser combinado com o concentrado magnético em uma próxima etapa do beneficiamento.

## Referências Bibliográficas

- 1) Carta, M., Ferrara, G.F., Del Fa', C., and Alfano, G., Contribution to the Electrostatic Separation of Minerals, VIIIth Int. Cong Min. Proc. Proc 427 – 446 (1964).
- 2) Kelly, E.G. and Spottiswood, D.J. The theory of Electrostatic Separations: A Review, Pt II. Minerals Engng. 2/2 (1989)
- 3) ERIEZ Magnetics – MANUAL Electrodynamic separators
- 4) HTE Series – MANUAL Electrostatic Separators
- 5) João Alves Sampaio, Adão Benvindo da Luz, Fernando Freitas Lins., Usinas de Beneficiamento de Minérios no Brasil - CETEM
- 6) BLAZY. P. La valorisation des mineraux. Paris. Presses Universitaires de France. 1970. 416p. p.166-175.
- 7) TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA In Memoriam Professor Paulo Abbi Andery. Fundação Instituto Tecnológico de Pernambuco. 1980. 399p. p.188-204.
- 8) INCULET, I. I. Electrostatic mineral separation. New York: Research Studies Press Ltd. 1984. 153p.
- 9) CHAVES, A. P.; CHAVES FILHO, R. C. Teoria e Prática no Tratamento de Minérios; v.6 . São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- 10) DA LUZ, B. A.; SAMPAIO, A. J.; DE ALMEIDA, A. J. Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro: CETEM-MCT Centro de Tecnologia Mineral, 204.
- 11) MATHIEU, G. I. and SEROIS, L. L. Advances in technology of magnetic separation.XIV Internatinal Mineral Processing. 1988. Amsterdam: Elsevier Science Publishing Company Inc. 2v. v.1. p.937-950.
- 12) DASTMANN, C. H. and UNKELBERG K. H. Optimization of superconducting magnetic system for a comertial scale high field drum separator. XIV Internatinal Mineral Processing Congress. 1988 Amsterdam: Elsevier Science Publishing Company Inc. 2v. v.1. p.905-915