

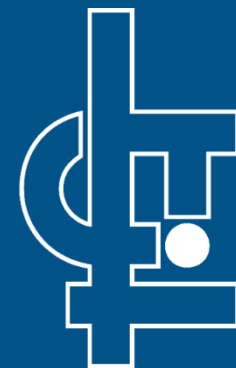


ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS E DE PETRÓLEO
LABORATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MATÉRIAS PRIMAS MINERAIS

SEPARAÇÕES MINERAIS EM LABORATÓRIO

Prof. Dr. Henrique Kahn
Dra. Manuela Tassinari
Profa. Dra. Carina Ulsen



lct@lct.poli.usp.br
www.lct.poli.usp.br

DIREITOS AUTORAIS

O material aqui apresentado foi preparado pelos professores Henrique Kahn e Carina Ulsen com apoio da equipe técnica do Laboratório de Caracterização Tecnológica.

Por favor respeite o trabalho dos autores.

Em caso de reprodução e/ou extração de conteúdo, cite os autores.

É expressamente proibida a reprodução de qualquer conteúdo deste documento sem a devida citação, fato sujeito às sanções legais cabíveis (Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, que regula os direitos autorais).

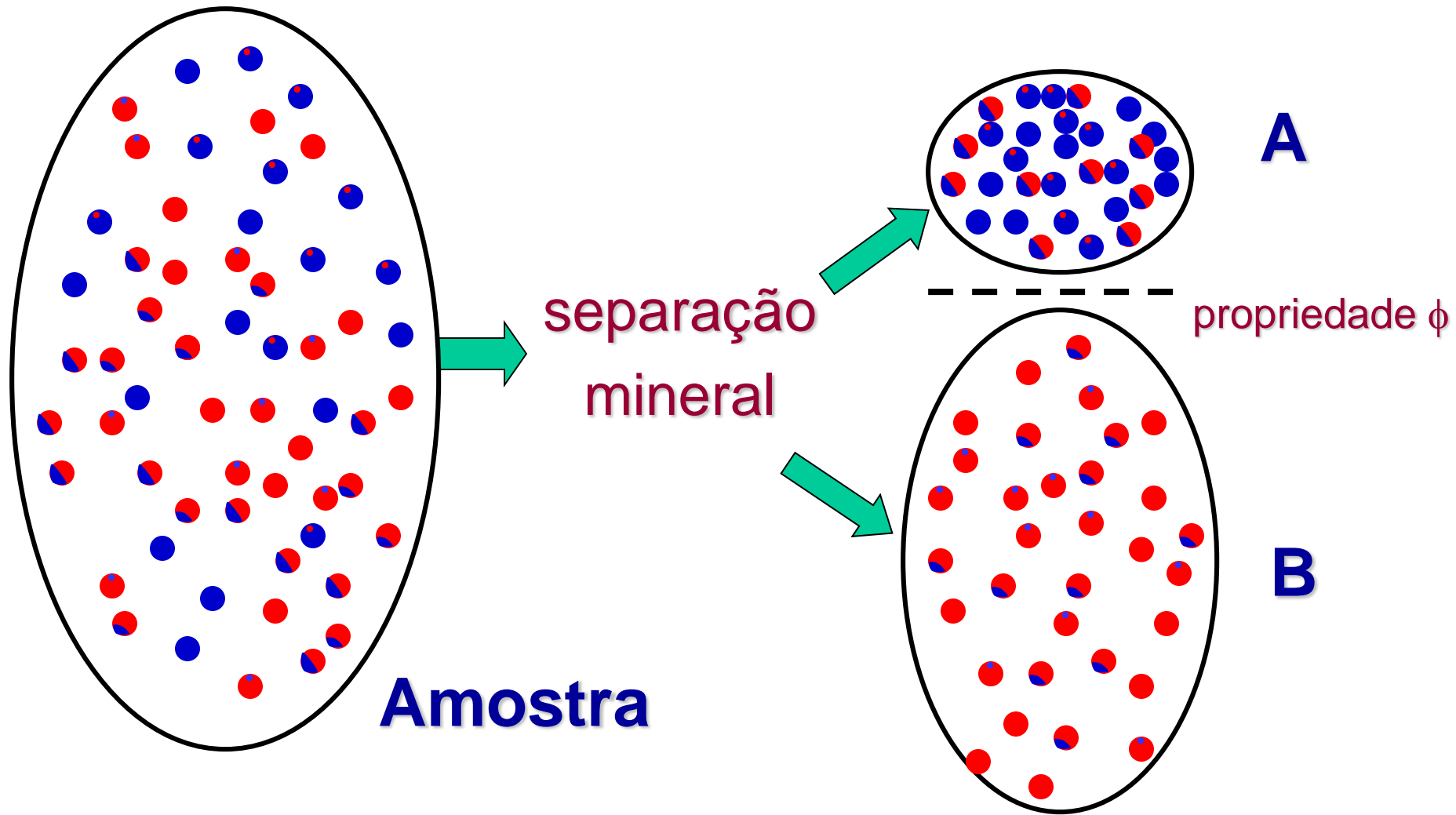
SEPARAÇÕES MINERAIS EM LABORATÓRIO

- **Emprego de diferenças entre as propriedades físicas dos diversos minerais presentes em uma amostra:**
 - ***peso específico***
 - ***susceptibilidade magnética***
 - ***condutibilidade elétrica***
 - ***hidrofobicidade / hidrofiliicidade***
 - ***cor***
 - ***solubilidade***

SEPARAÇÕES MINERAIS EM LABORATÓRIO

- **permitem individualização de assembléias ou espécies minerais;**
- **auxiliam na identificação das fases;**
- **determinação quantitativa da composição mineralógica;**
- **definição de forma, granulação;**
- **associações minerais → liberação.**

SEPARAÇÕES MINERAIS EM LABORATÓRIO



SEPARAÇÕES MINERAIS EM LABORATÓRIO

□ **Objetivos:**

- ***facilitar a identificação dos minerais***
- ***auxiliar na quantificação dos minerais***
- ***facilitar o estudo de suas características intrínsecas***
- ***avaliar as características de associação entre as espécies presentes***
- ***determinar teores máximos passíveis de serem obtidos, bem como o balanço metalúrgico***
- ***determinar teores mínimos dos contaminantes intimamente associados aos concentrados***

MÉTODOS DE SEPARAÇÃO

- **Métodos densitários**
- **Métodos magnéticos**
- **Métodos elétricos**
- **Flotação**
- **“Sorting”**
- **Dissolução seletiva**

SELEÇÃO DO MÉTODO A SER APLICADO

- O método a ser empregado depende de:
 - ***granulometria da amostra***
 - ***propriedade física diferenciadora***

SEPARAÇÃO POR MEIO DENSO

- utilização de um meio de imersão com densidade intermediária entre as espécies que se deseja separar
 - os minerais com densidade inferior à do meio flutuam:
flutuado, leve, “float”, $d <$
 - os minerais de densidade maior afundam:
afundado, pesado, “sink”, $d >$

SEPARAÇÃO POR MEIO DENSO

- elevada eficiência em ampla faixa de granulação
- ensaios são efetuados preferencialmente em faixas granulométricas estreitas

SEPARAÇÃO POR MEIO DENSO

□ Características de um meio denso ideal:

- *estabilidade da suspensão ou solução*
- *baixa viscosidade*
- *fácil ajuste de densidade*
- *boa miscibilidade com os solventes usuais*
- *transparente;*
- *baixo custo*
- *não ser tóxico*
- *não ser corrosivo*
- *não reagir com a amostra*
- *passível de ser recuperado*

TIPOS DE MEIO DENSO

- Líquidos orgânicos
- Soluções aquosas de compostos salinos
- Fluidos paramagnéticos
- Suspensões de sólidos em água

LÍQUIDOS ORGÂNICOS

- Muito utilizados em escala de laboratório, constituindo uma das principais técnicas de separação
- São tóxicos → ensaios em capela ventilada

PRINCIPAIS LÍQUIDOS ORGÂNICOS

líquido orgânico	composição química	densidade a 20°C (g/cm³)	pressão de vapor mm Hg (20°C)
Bromofórmio	CHBr₃	2,86	5
Tetra-bromo-etano	CHBr₂CHBr₂	2,96	<1
Di-iodeto de metileno	CH₂ I₂	3,32	1,25 (25°C)
Solução de Clérici	formiato- malonato de tálio	4,40 (35° C); 5,10 (100° C)	...

PRINCIPAIS SOLVENTES

<i>LÍQUIDO ORGÂNICO</i>	<i>SOLVENTE</i>
Bromofórmio	<i>etanol, éter, benzeno, tetracloreto de carbono</i>
Tetra-bromo-etano	<i>Acetona, álcool, benzeno,éter, tetracloreto de carbono, clorofórmio, xilol, benzoato de benzila</i>
Di-iodeto de metileno	<i>Etanol, metanol acetona, éter, clorofórmio, dimetil sulfoxido, benzoato de benzila</i>
Solução de Clérici	<i>água</i>

Os solventes apresentam elevado grau de evaporação com pontos de ebulição inferiores aos dos líquidos densos utilizados.

SOLUÇÕES AQUOSAS DE COMPOSTOS SALINOS

- Solução de cloreto de zinco (ZnCl_2) é usada em laboratório para estudos de lavabilidade de carvões, podendo atingir densidade de até $1,8 \text{ g/cm}^3$
 - ***Carvão metalúrgico : $d < 1,5 \text{ g/cm}^3$***
 - ***Carvão vapor (termoelétrica): $1,5 < d < 1,75 \text{ g/cm}^3$***

SOLUÇÕES AQUOSAS DE COMPOSTOS SALINOS ALTERNATIVAS AOS LÍQUIDOS ORGÂNICOS

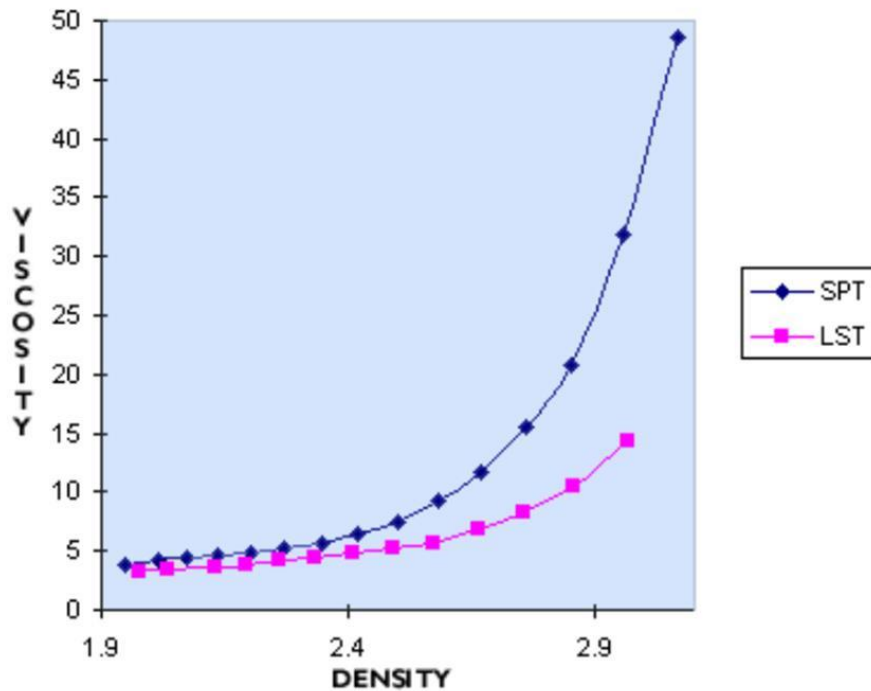
- Sais a base de tungstênio; surgiram como uma alternativa aos líquidos orgânicos densos:
 - **LST, solução de heteropolitungstatos de lítio em água:**
 - densidades de 2,95 g/cm³ a 25°C e de até 3,5 g/cm³ a altas temperaturas
 - baixa toxicidade → contato com pele e olhos
 - viscosidade idêntica a do TBE (10cP) e elevada estabilidade a temperaturas de até 140°C (soluções de lavagem das amostras podem ser recuperadas por ebulição da água)
 - preço USD \$ 950,00 / litro
 - maiores informações: <http://www.heavyliquids.com>

SOLUÇÕES AQUOSAS DE COMPOSTOS SALINOS ALTERNATIVAS AOS LÍQUIDOS ORGÂNICOS (CONT.)

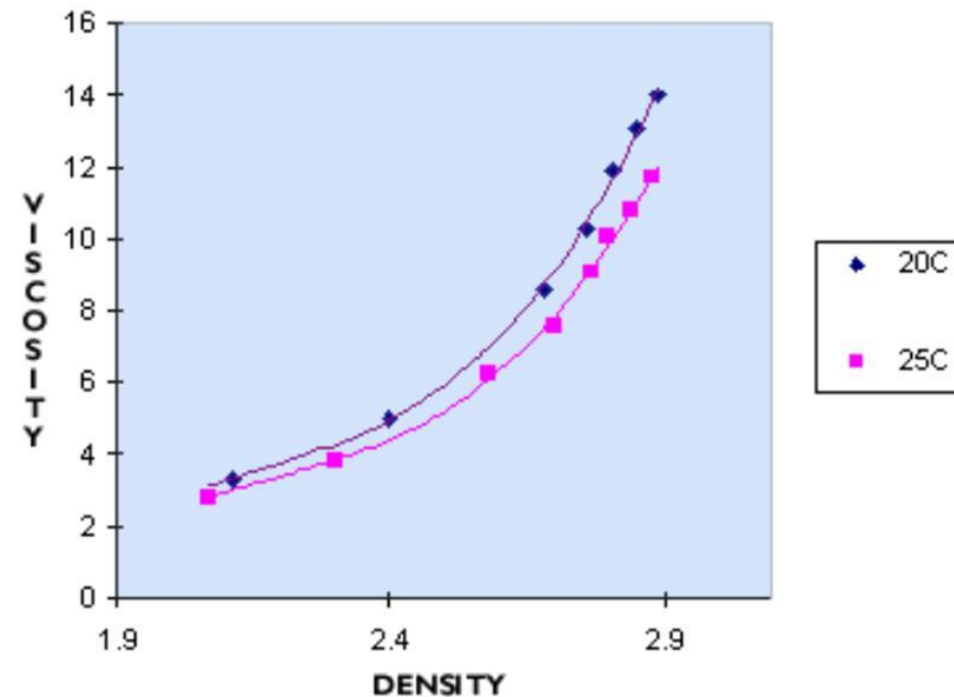
- Sais a base de tungstênio
 - **SPT**, solução de sódio politungstato:
 - na densidade de $2,85 \text{ g/cm}^3$ apresenta o dobro da viscosidade do TBE e LST (20cP → maior dificuldade de separação e de filtragem)
 - baixa toxicidade → evitar contato com pele e olhos
 - baixa estabilidade térmica acima de 80°C (maior dificuldade de recuperação da solução resultante da lavagem das amostras)

SOLUÇÕES AQUOSAS DE COMPOSTOS SALINOS

COMPARATIVO LST X SPT



Viscosidade em função da densidade



Viscosidade LST em função de temperatura

COMPARAÇÃO DE PREÇOS

	δ (g/cm ³) a 20° C	PREÇO US \$ / LITRO
BROMOFÓRMIO	2,85	440
TETRA-BROMO-ETANO	2,96	425 ⁽¹⁾
LST	2,95	950 ⁽²⁾ ou 1450 ⁽¹⁾
SPT-0	2,89	1497 ⁽¹⁾
DI-IODETO DE METILENO	3,32	761 ⁽¹⁾

Nota: valores estimados (FOB, base 2011)

1 - <http://www.geoliquids.com/products.html>

2 - <http://www.heavyliquids.com/>

ESCOLHA DA DENSIDADE DO MEIO DE SEPARAÇÃO

➤ Objetivos do estudo

□ Função dos minerais presentes:

- *Por exemplo, se o quartzo ($d=2,67\text{g/cm}^3$) for o principal mineral de ganga utiliza-se bromofórmio ($d \leq 2,86\text{g/cm}^3$).***
- *Se no produto afundado resultante houver outros silicatos mais pesados (ferro-magnesianos) pode-se optar pelo uso de outro líquido (d mais elevada), procedendo-se a novas e sucessivas separações, gerando produtos com minerais de densidades cada vez maiores (liberados ou mistos).***

DENSIDADES INTERMEDIÁRIAS

- podem ser obtidas com a utilização de **solventes**;
- **solventes** são líquidos totalmente miscíveis com os líquidos densos;
- são usados também para a lavagem dos produtos obtidos na separação;
- solventes devem possuir baixa pressão de vapor, de modo a manter a estabilidade da densidade do meio.

PROCEDIMENTOS USUAIS DE ENSAIO

- **Determinação e controle da densidade do meio:**
 - ***para se determinar a densidade do meio utilizam-se:***
 - *conjunto de pastilhas com densidades padronizadas;*
 - *medida do índice de refração do líquido;*
 - *densímetros;*
 - *balão volumétrico e balança. ****
 - ***a densidade do meio deve ser verificada sistematicamente a intervalos de tempo regulares, particularmente no caso de misturas com solventes.***

PROCEDIMENTOS USUAIS DE ENSAIO

□ Amostra:

- ***deve-se remover previamente a fração fina da amostra (peneiramento ou deslamagem);***
- ***a amostra deve ser previamente seca à temperatura de 110°C;***
 - *esta temperatura poderá ser alterada em função de características específicas dos minerais presentes*
- ***quanto mais estreito for o intervalo de granulação da amostra, maior será a eficiência da separação.***

PROCEDIMENTOS USUAIS DE ENSAIO

□ Aparelhagem:

➤ sua escolha depende da granulometria do material a ser ensaiado:

- *balde***
- *béquer***
- *funil de separação***
- *centrífuga***

Aparelhagem de ensaio

□ Balde:

- ***para granulações superiores a 10 mm***

□ Bequer:

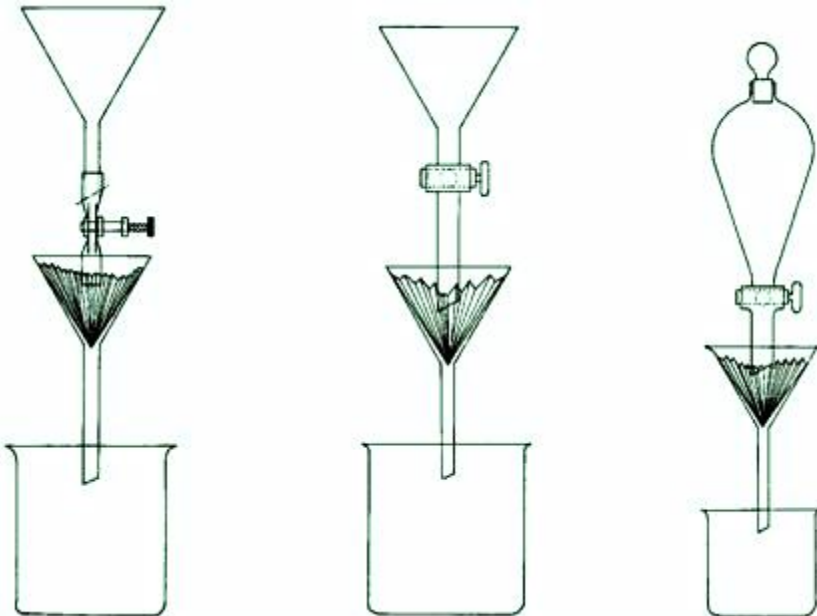
- ***para materiais de granulação superior a 1,7 mm***



Aparelhagem de ensaio

□ **Funil de separação:**

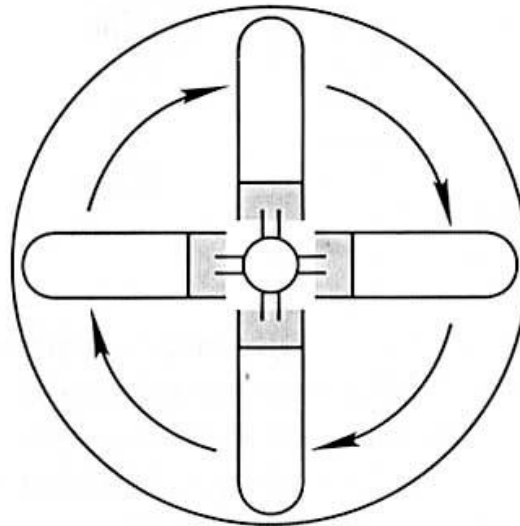
- *é utilizado para materiais usualmente com granulação entre 1,7 e 0,074 mm*



Aparelhagem de ensaio

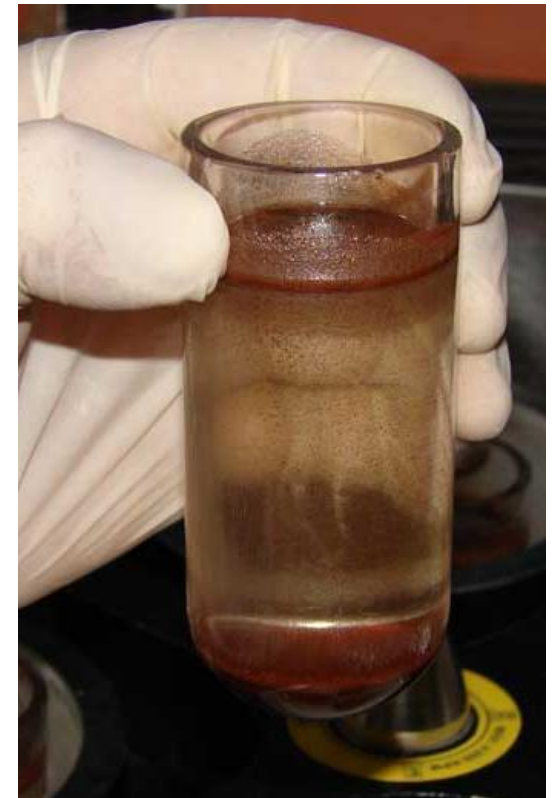
□ Centrífuga:

- ***é usada para separar minerais de granulação fina, principalmente para partículas de dimensões inferiores a 0,074 mm;***
- ***a operação é feita com número par de frascos, com massas equilibradas***



Aparelhagem de ensaio

□ **Centrífuga**



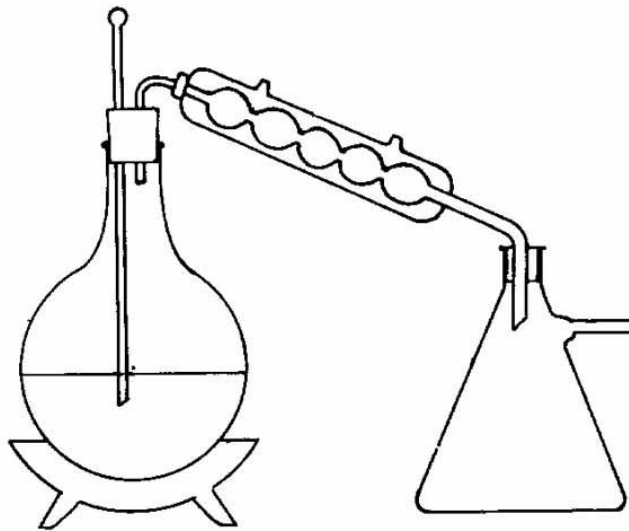


RECUPERAÇÃO DE LÍQUIDOS DENSOS

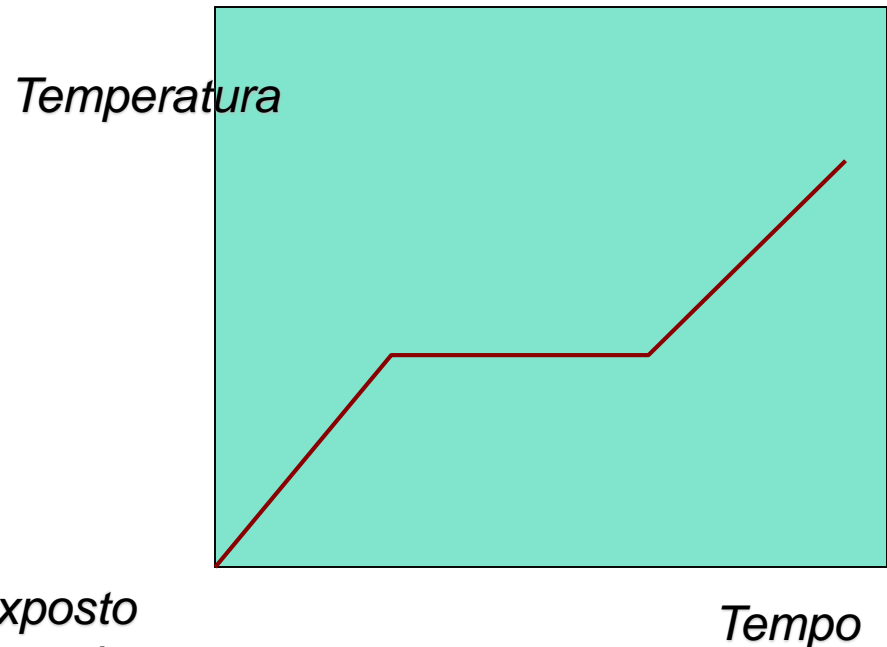
- deve-se evitar toda e qualquer perda de líquidos densos em função de seu elevado custo e disponibilidade no mercado interno
- a lavagem dos produtos obtidos na separação deve ser feita com solventes apropriados
- a separação da solução líquido denso-solvente pode ser feita de duas maneiras:
 - *destilação fracionada*
 - *adição*
- os líquidos orgânicos recuperados normalmente apresentam coloração levemente alterada, porém sem mudanças de suas propriedades características.

Recuperação de líquidos densos - Destilação fracionada

- diferença de temperatura de ebulição existente entre o líquido denso e o solvente (ponto de ebulição mais baixo).



após a destilação, deixa-se o líquido exposto ao ar (capela ventilada) para que atinja maior grau de pureza



RECUPERAÇÃO DE LÍQUIDOS DENSOS - ADIÇÃO (BROMOFÓRMIO)

- Consiste na adição de uma terceira fase líquida (normalmente água), que seja miscível exclusivamente com o solvente utilizado
- Este processo se aplica especialmente ao **bromofórmio** quando da utilização de álcool como solvente

PRECAUÇÕES → LÍQUIDOS ORGÂNICOS

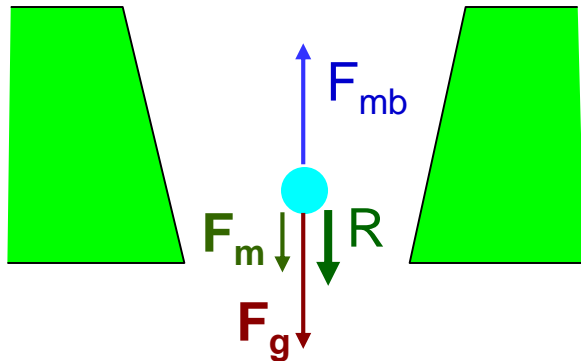
- Líquidos densos orgânicos e seus solventes (exceto a água) são tóxicos
- Todas as operações de separação devem ser feitas em capela ventilada
- Deve-se fazer uso de luvas e máscaras protetoras, evitando-se o contato com a pele e a inalação dos vapores tóxicos

SEPARAÇÃO POR FLUIDOS PARAMAGNÉTICOS

- ***Um fluido paramagnético colocado sob a ação de um campo magnético não uniforme fica sujeito a uma força atrativa, direcionada para a região onde o campo magnético é maior***
- ***Dispondo desta ação e combinando-a com a ação de campo gravitacional e/ou de forças centrífugas, é possível estabelecer um gradiente de densidade aparente no meio, permitindo a separação de minerais:***
 - ❑ ***minerais não magnéticos → densidade;***
 - ❑ ***fracamente magnéticos → densidade e susceptibilidade magnética.***

SEPARAÇÃO POR FLUIDOS PARAMAGNÉTICOS

CAMPO MAGNÉTICO \Leftrightarrow CAMPO GRAVITACIONAL



F_g = força gravitacional

F_m = força magnética atuando diretamente sobre a partícula (quando magnética)

F_{mb} = força "empuxo" face à diferença de pressão no fluido, gerada pelo campo magnético atuante sobre o fluido

R = força resultante.

SEPARAÇÃO POR FLUIDOS PARAMAGNÉTICOS

CAMPO MAGNÉTICO ⇔ CAMPO GRAVITACIONAL

- O aumento obtido na densidade do fluido é dado por:

$$\delta_m = F_v / g, \text{ onde:}$$

δ_m = *densidade suplementar equivalente devido ao campo magnético,*

g = *aceleração devido ao campo gravitacional*

- Densidade aparente do fluido neste ponto é dada por:

$$\delta_a = \delta_f + \delta_m, \text{ onde:}$$

δ_f = *densidade real do fluido,*

δ_m = *densidade aparente do fluido.*

- **Limitação:** as forças de separação não passam de uma fração da força gravitacional.

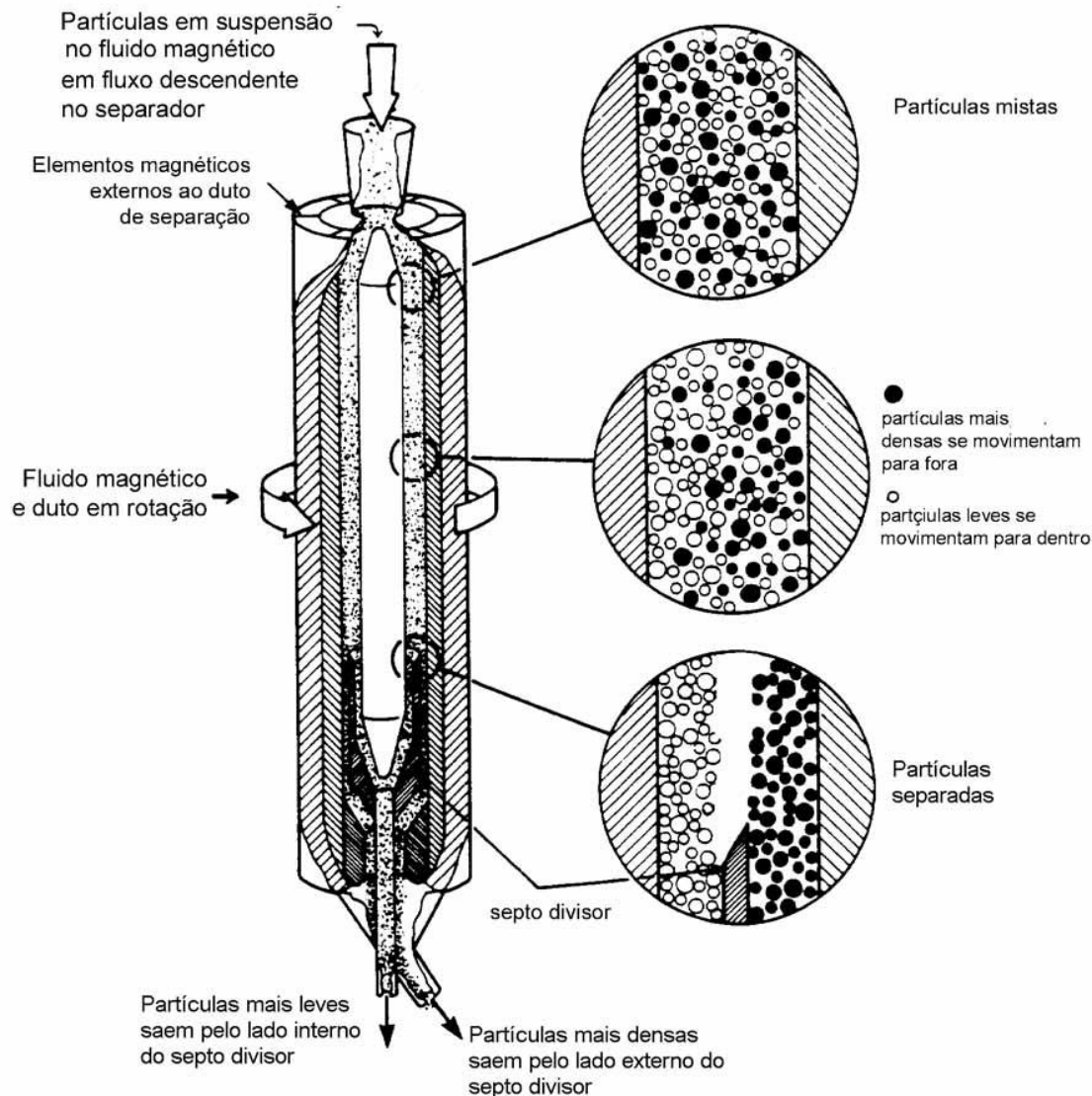
SEPARAÇÃO POR FLUIDOS PARAMAGNÉTICOS

CAMPO MAGNÉTICO ⇔ CAMPO GRAVITACIONAL

- Equipamentos:
 - ***Adaptação de separador Frantz com emprego de $MnCl_2$ (década de 60)***
 - ***Magstream - IGC (fora de fabricação)***

MAGSTREAM - IGC

CAMPO MAGNÉTICO \Leftrightarrow CAMPO CENTRÍFUGO



MAGSTREAM - IGC

CAMPO MAGNÉTICO ↔ CAMPO CENTRÍFUGO

- Separações entre 1,6 e 20 g/cm³
- Alta sensibilidade das condições operacionais:
 - ***granulação (0,6 a 0,04mm)***
 - ***susceptibilidade magnética do fluido x densidade do fluido***
 - ***densidade de corte***
 - ***limites extremos de densidades das partículas presentes***

MAGSTREAM X LÍQUIDO DENSO

□ Principais vantagens:

- ***ampla variação da densidade de corte, utilizando, apenas, um único meio de separação: 1,6 a 20 g/cm³***
- ***não toxicidade do reagente utilizado, dispensando a utilização de sistemas apropriados de ventilação e exaustão***
- ***baixo custo operacional quando comparado aos líquidos orgânicos. O consumo de MAGFLUID e o tempo despendido na separação são próximos aos verificados quando no uso de líquidos densos***

MAGSTREAM X LÍQUIDO DENSO

□ Principais desvantagens:

- ***granulometria de operação em faixa mais estreita (0,60 a 0,040 mm)***
- ***eficiência de separação inferior à verificada para os líquidos densos***
- ***as partículas paramagnéticas são separadas em função de suas características magnéticas e densitárias, ou seja, as densidades de corte são variáveis em função da susceptibilidade magnética das partículas***
- ***elevado custo de investimento inicial***
- ***equipamento fora de fabricação***

MAGSTREAM X LÍQUIDO DENSO

- ***Comparação de resultados:***
(amostras de areia com MP)

AMOSTRA	% EM PESO DE PESADOS	
	Magstream	Bromofórmio
A	4,17	2,28
B	13,77	11,89
C	42,06	40,54
D	88,93	91,13
E	95,49	99,24

Densidades de corte: Magstream = 2,90 g/cm³

Bromofórmio = 2,86 g/cm³

- ***utilização indicada em complementação à separação em líquidos densos (densidades mais elevadas)***

SEPARAÇÃO EM MESA MOZLEY *(MOZLEY MINERAL SEPARATOR)*

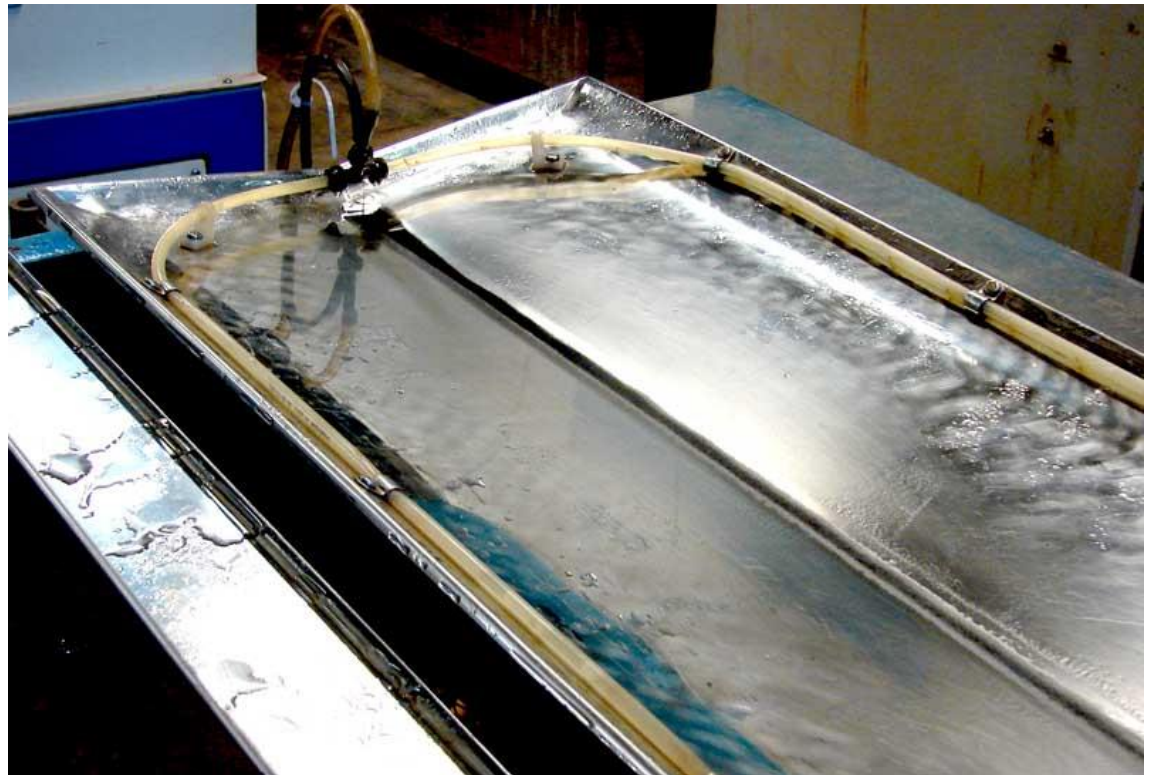
- É um equipamento que promove separações em meio aquoso, através de movimentos de oscilação;
- Reproduz os movimentos de um bateamento

Corresponde a uma alternativa interessante para separações que requerem densidades superiores aos líquidos densos, particularmente quando não se dispõe de aparelho de separação magneto-densitária ou o material é paramagnético.

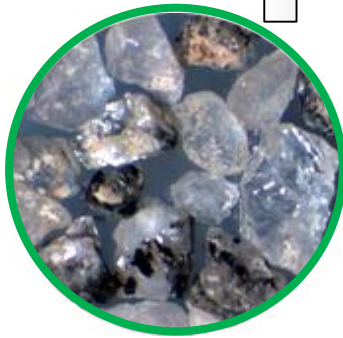
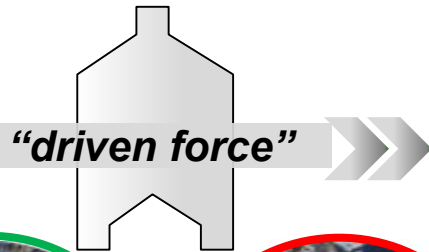


SEPARAÇÃO EM MESA MOZLEY *(MOZLEY MINERAL SEPARATOR)*

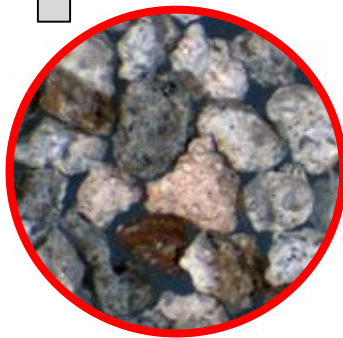
- Requer cuidados operacionais com acurado controle visual da qualidade dos produtos
- Pode-se obter resultados mais reprodutíveis que o bateamento



PROCESSAMENTO MINERAL



Product
recycled sand

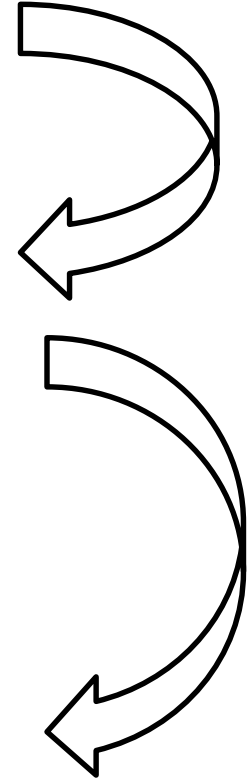


Waste
high porosity particles

(1) Comminution

(2) Separation

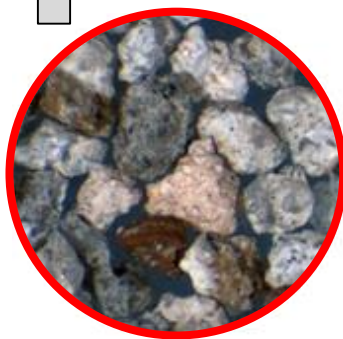
**(3) Products
characterization**



PROCESSAMENTO MINERAL



Product
recycled sand

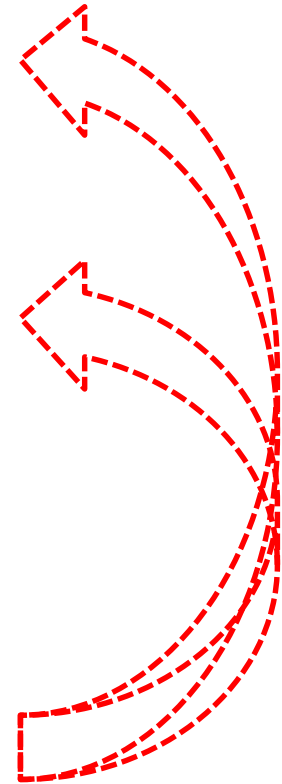


Waste
high porosity particles

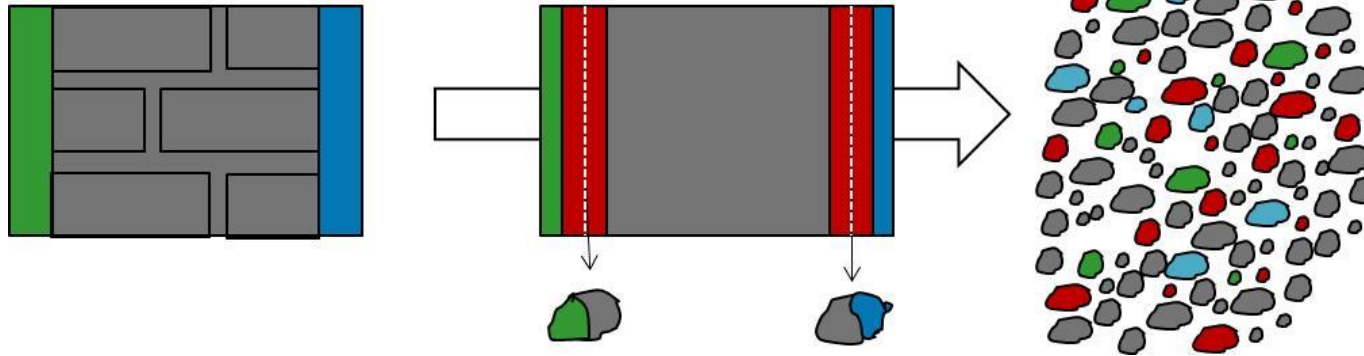
(1) Comminution

(2) Separation

**(3) Products
characterization**



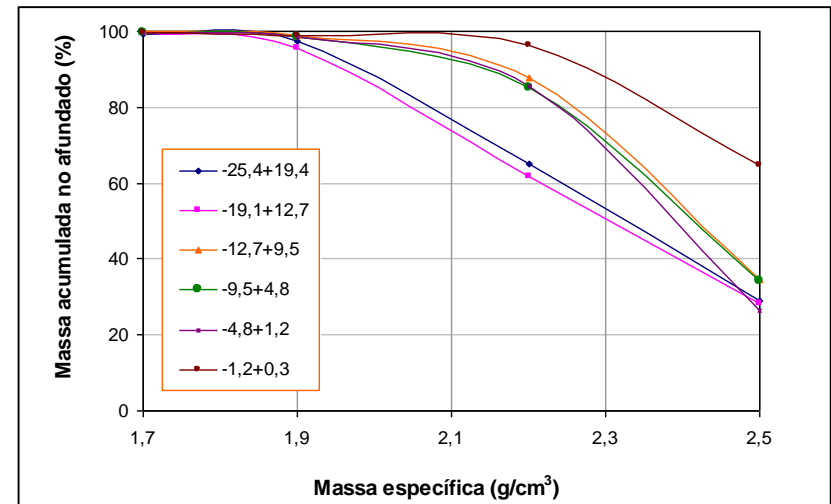
PROCESSAMENTO MINERAL



Separation is impracticable if liberation has not been successfully accomplished (Gaudin, 1939)

COMMINUTION

- Particle size for liberation
- Mechanism/Equipment

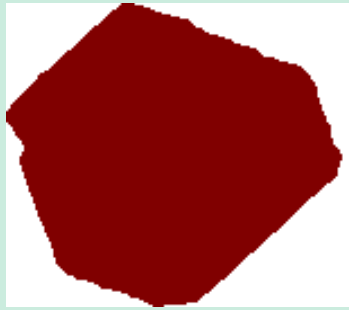


PROCESSAMENTO MINERAL

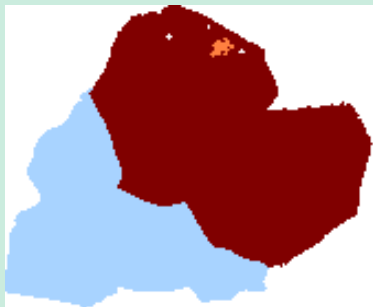
Liberação do mineral útil



LIVRE



MISTA



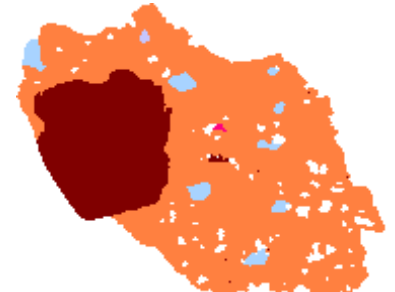
MISTO - FRAÇÃO MINERAL ÚTIL : ÁREA X PERÍMETRO



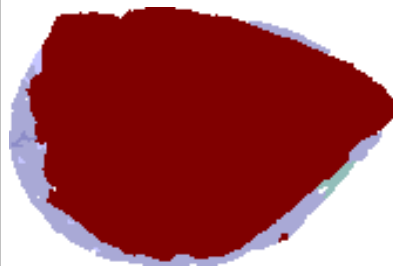
área: 90%
perímetro: 100%



área: 50%
perímetro: 5%



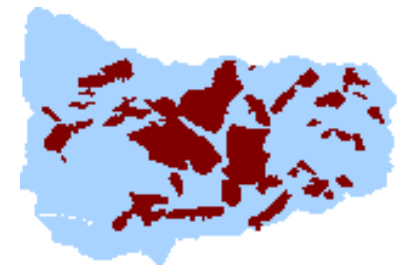
área: 20%
perímetro: 5%



área: 90%
perímetro: 25%

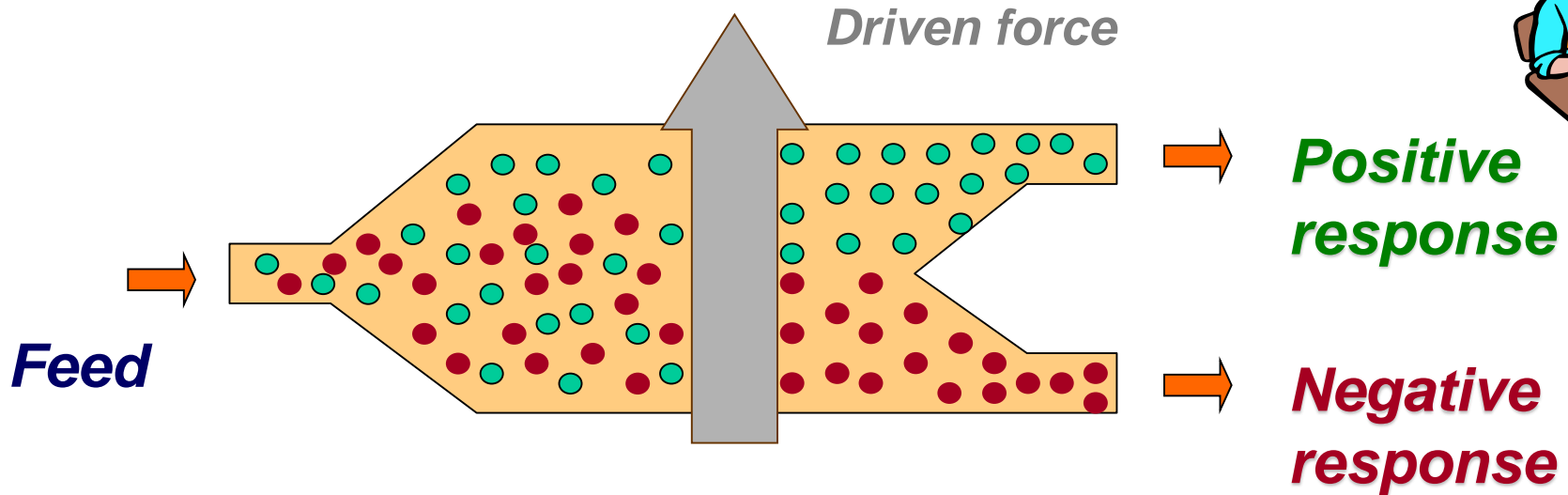


área: 40%
perímetro: 5%



área: 35%
perímetro: 0%

PROCESSAMENTO MINERAL



SEPARATION

- What to separate
- Differential properties
- How to separate

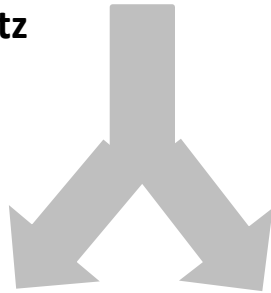


- densidade
- físico-química de superfície
- susceptibilidade magnética
- condutibilidade elétrica

PROCESSAMENTO MINERAL – EXEMPLO OURO



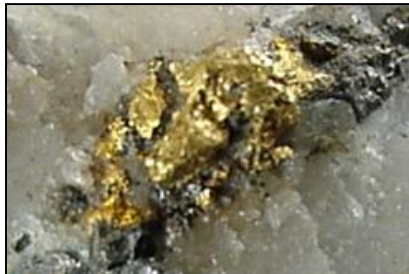
Gold + Quartz



Separation by density

Quartz $d=2,65$

Au $d=19,1$



Product

Gold bearing particles



Waste

Quartz/others

COMMINUTION

Particle size for liberation

Separability curves by density

Chemical analysis

Grade x recovery by particle size

Mechanism/Equipment

SEPARATION

What to separate/concentrate

Gold bearing particles

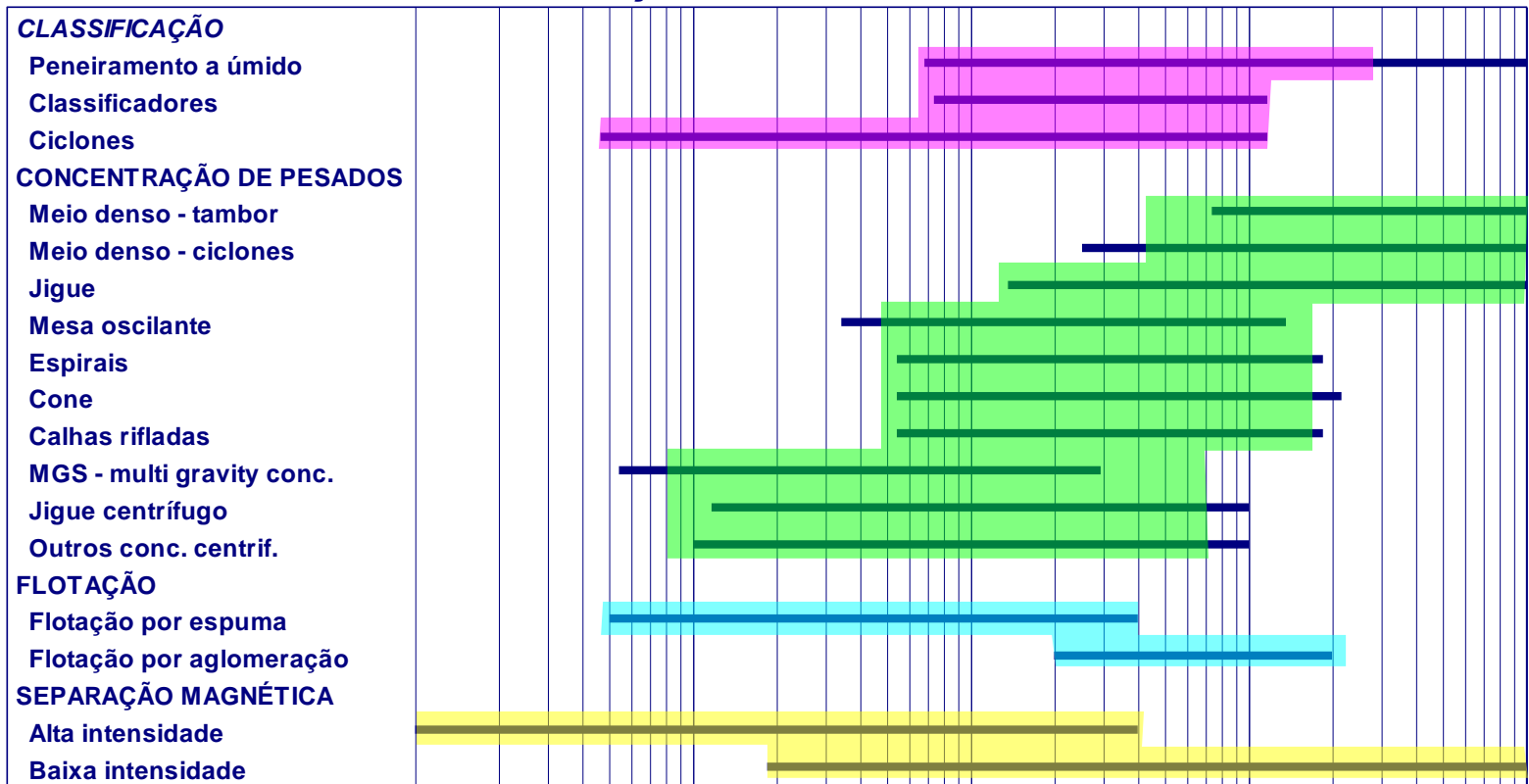
Differential properties

Density

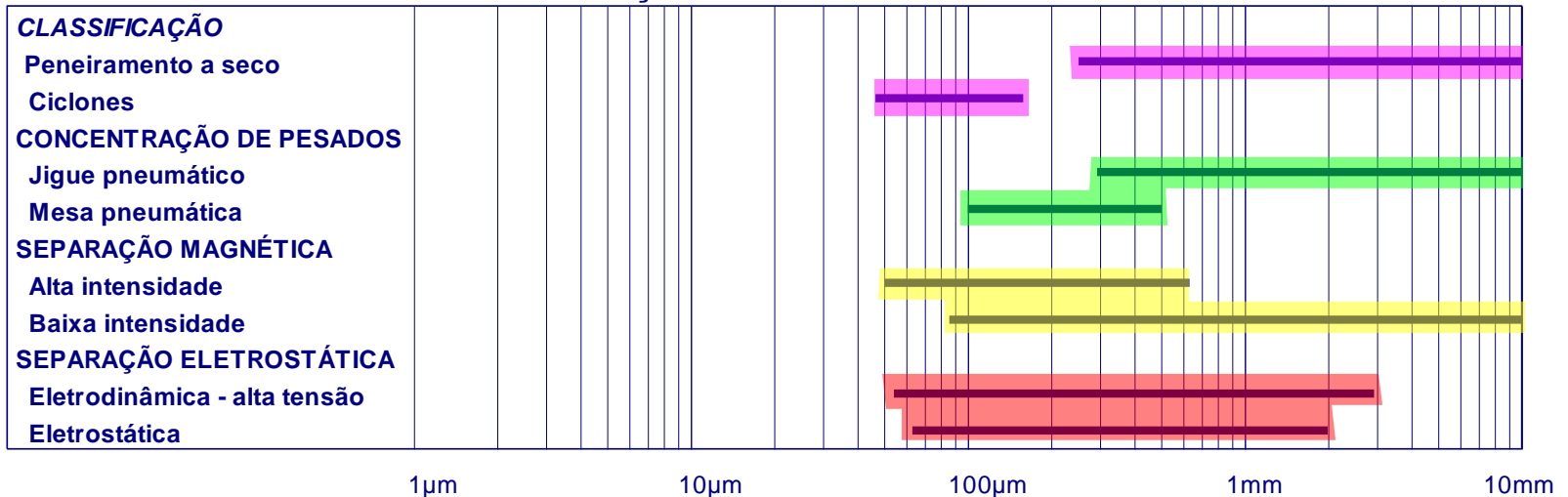
How to separate

Different equipment depending on particle size

OPERAÇÕES UNITÁRIAS A ÚMIDO



OPERAÇÕES UNITÁRIAS A SECO



1µm

10µm

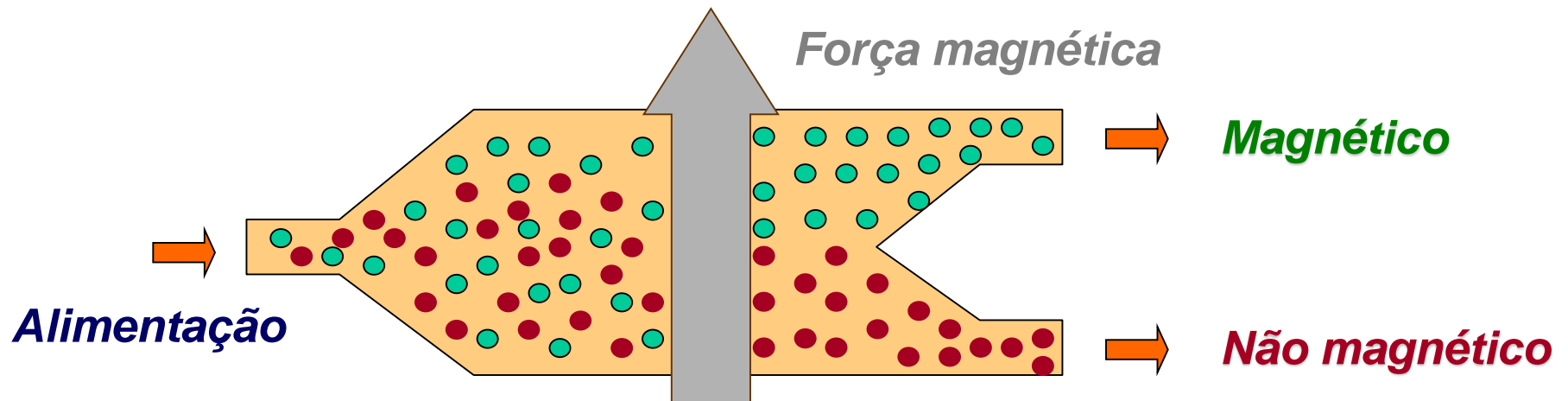
100µm

1mm

10mm

SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

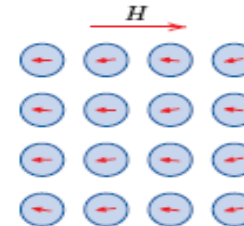
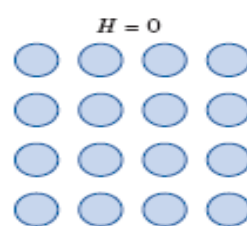
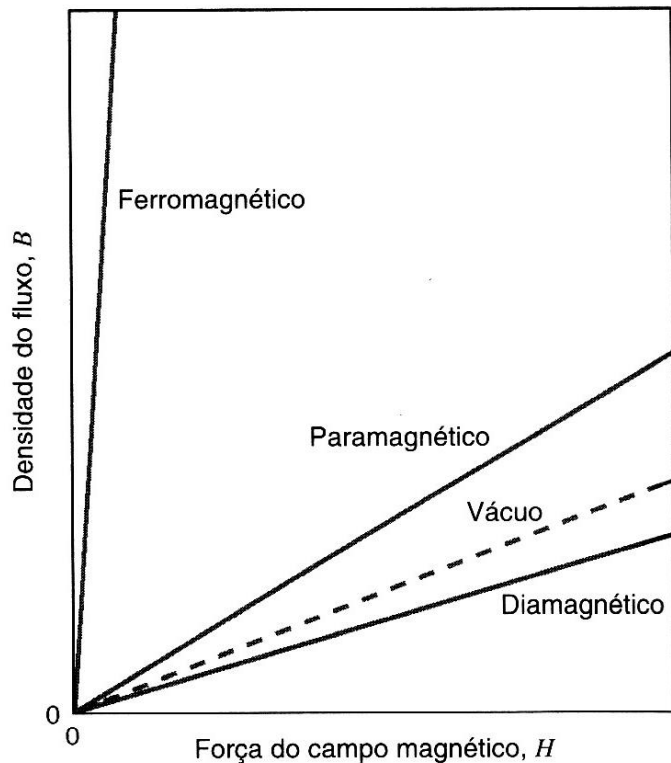
- ❑ Condição para separação magnética?
- ❑ Quais minerais são magnéticos?



SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

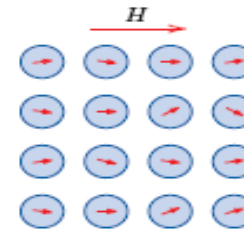
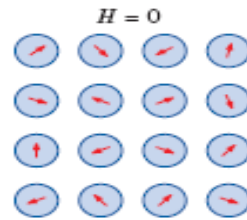


Orientação dos dipolos com aplicação de campo magnético



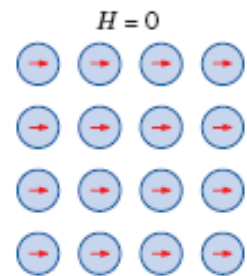
Diamagnético
Indução de dipolos em direção oposta ao H (campo magnético)

(a)



Paramagnético
Indução de dipolos na direção do H

(b)

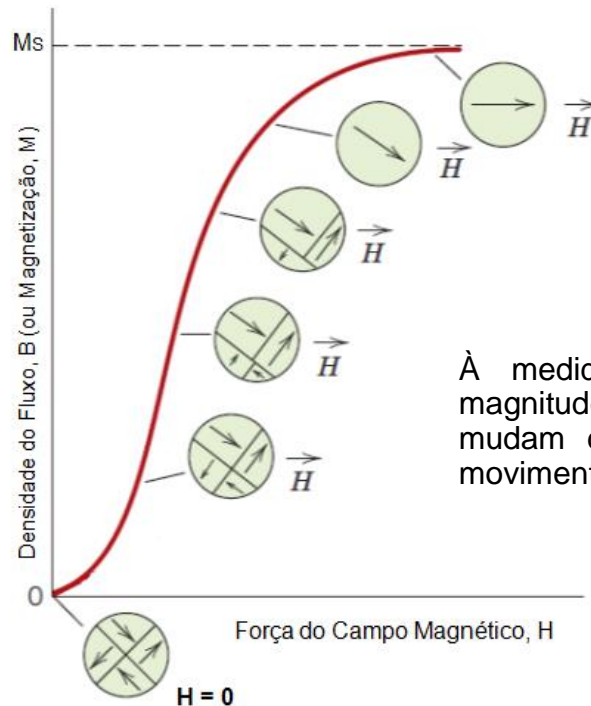
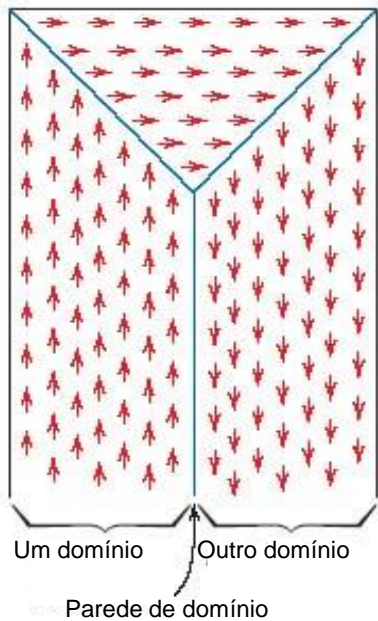


Ferromagnético
Momento magnético mesmo na ausência de H

Ex. magnetita, pirrotita

Video aula <http://eaulas.usp.br/porta1/video.action;jsessionid=BEAC8A024B8B7988E33FD5E633BE9306?idItem=6208>

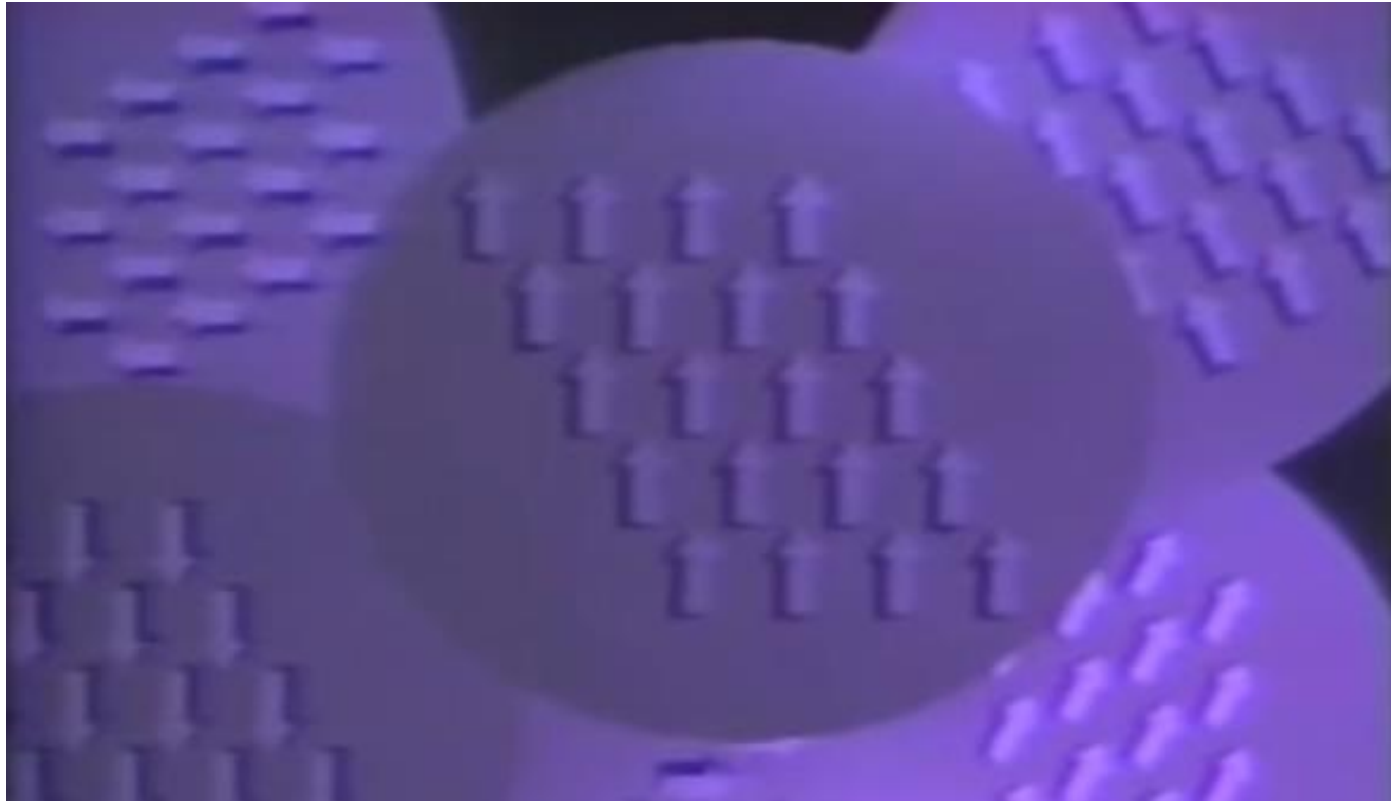
SEPARAÇÃO MAGNÉTICA



À medida que um campo externo H de magnitude crescente é aplicado, os domínios mudam de forma e de tamanho mediante o movimento das paredes de domínio.

- Os materiais ferromagnéticos são constituídos de regiões volumétricas microscópicas onde os momentos de dipolo magnético se encontram alinhados, tendo a mesma direção e sentido. Tais regiões são chamadas de **DOMÍNIOS**. **Cada domínio está magnetizado até a sua magnetização de saturação.**
- Geralmente, o tamanho dos domínios está na **escala micrométrica** e, para um material policristalino, cada grão pode conter mais de um domínio.
- Os domínios adjacentes estão separados por **PAREDES DE DOMÍNIO**

SEPARAÇÃO MAGNÉTICA



3'39" Movimento dos elétrons 6'09" Domínios magnéticos

<https://www.youtube.com/watch?v=tnNOHJ3m2VY>

SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

A separação magnética está relacionada:

- *ao comportamento das partículas de diversos minerais quando expostas a um mesmo campo magnético;*
- *às forças magnéticas que atuam sobre elas.*

$$F_m = m \cdot X \cdot H \left(\frac{dH}{dx} \right)$$

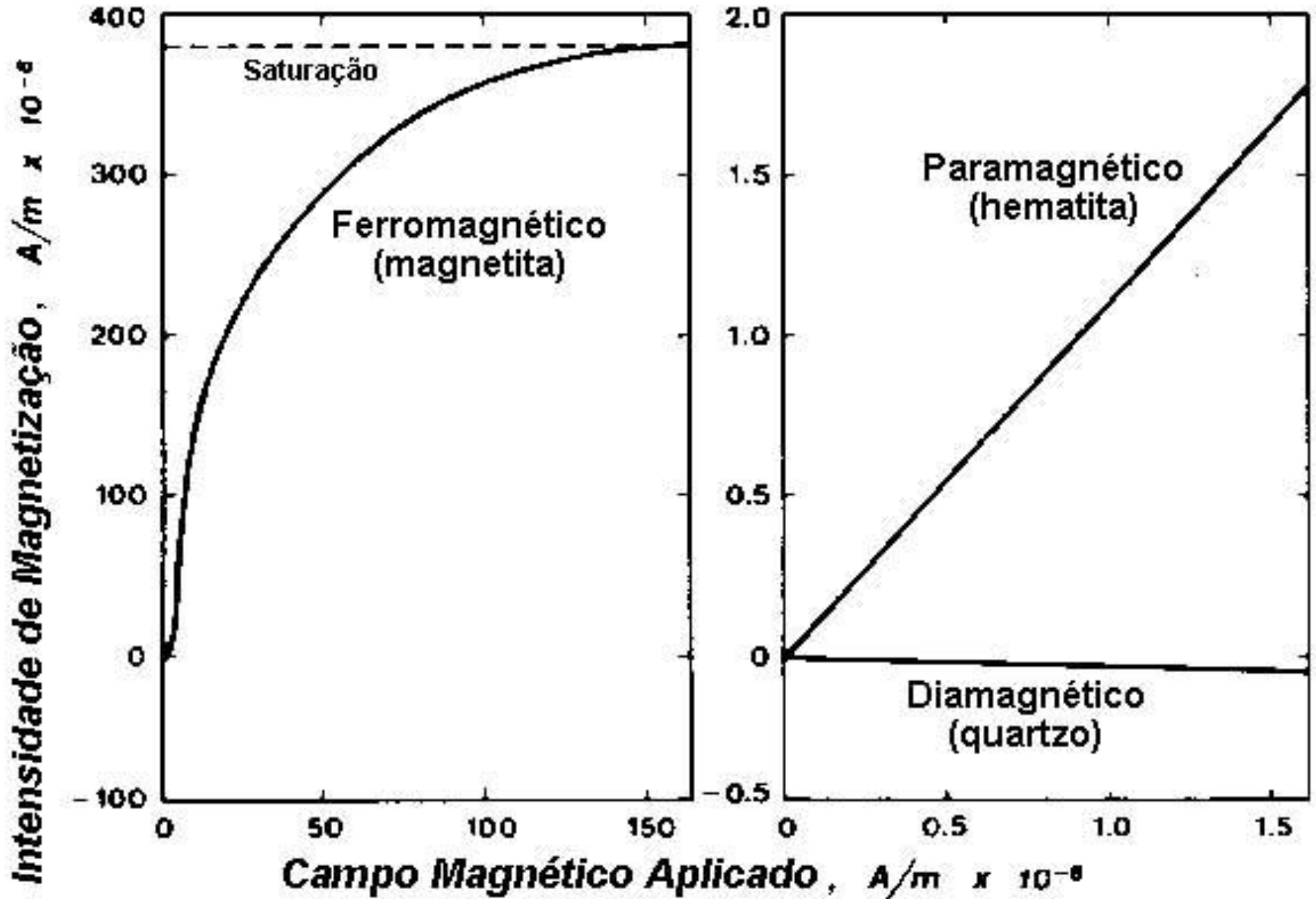
F_m = força magnética
H = campo magnético
dH/dX = gradiente de campo magnético

M = massa
X = susceptibilidade magnética

Propriedade do separador

Propriedade dos minerais/amostra

COMPORTAMENTOS MAGNÉTICOS DE PARTÍCULAS



VARIÁVEIS QUE ATUAM SOBRE AS PARTÍCULAS

- além da susceptibilidade magnética, outras variáveis também interferem no processo de separação:
 - **Densidade;**
 - **Granulometria;**
 - **Forma dos grãos;**
 - **Anisotropia**
 - **Outros (depende do separador)**
 - **Partículas mistas → liberação**

EQUIPAMENTOS DE SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

- vários são os equipamentos empregados:
 - *operações a seco ou úmido;*
 - *baixa a alta intensidade de campo magnético*

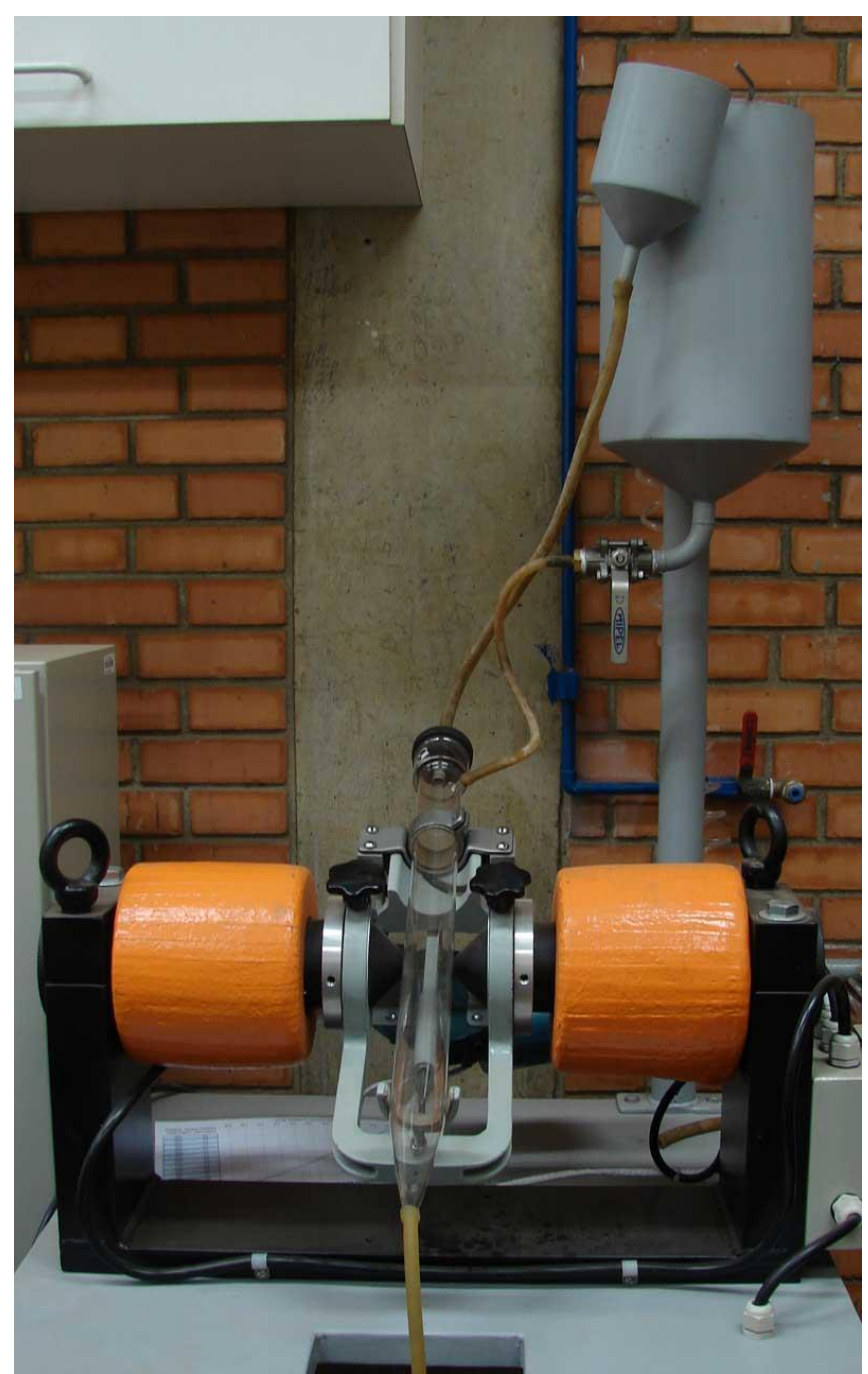
- o campo magnético pode ser gerado por:
 - *ímãs permanentes;*
 - *ímãs permanentes compostos de terras raras;*
 - *bobinas eletromagnéticas.*

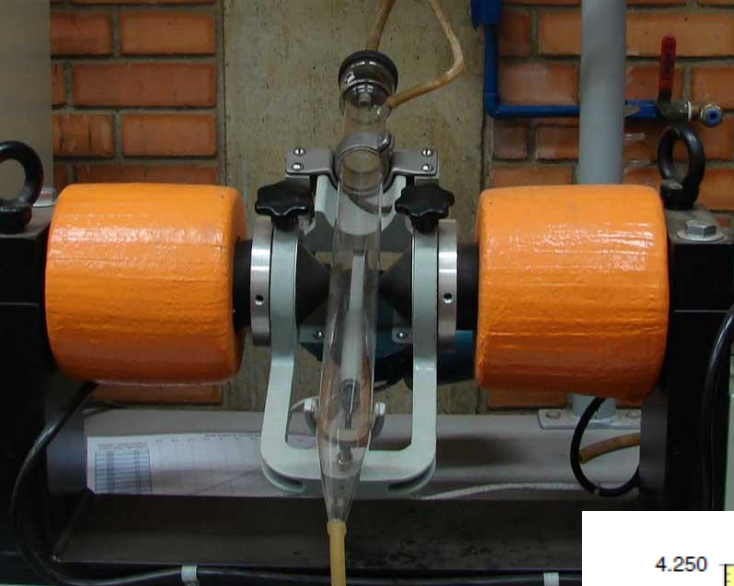
EQUIPAMENTOS DE SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

- baixa intensidade de campo (minerais ferromagnéticos)
 - *operações a seco ou úmido:*
 - *Imã permanente;*
 - *Tubo Davis;*
 - *operações a úmido (contínua):*
 - *tambores magnéticos*

TUBO DAVIS

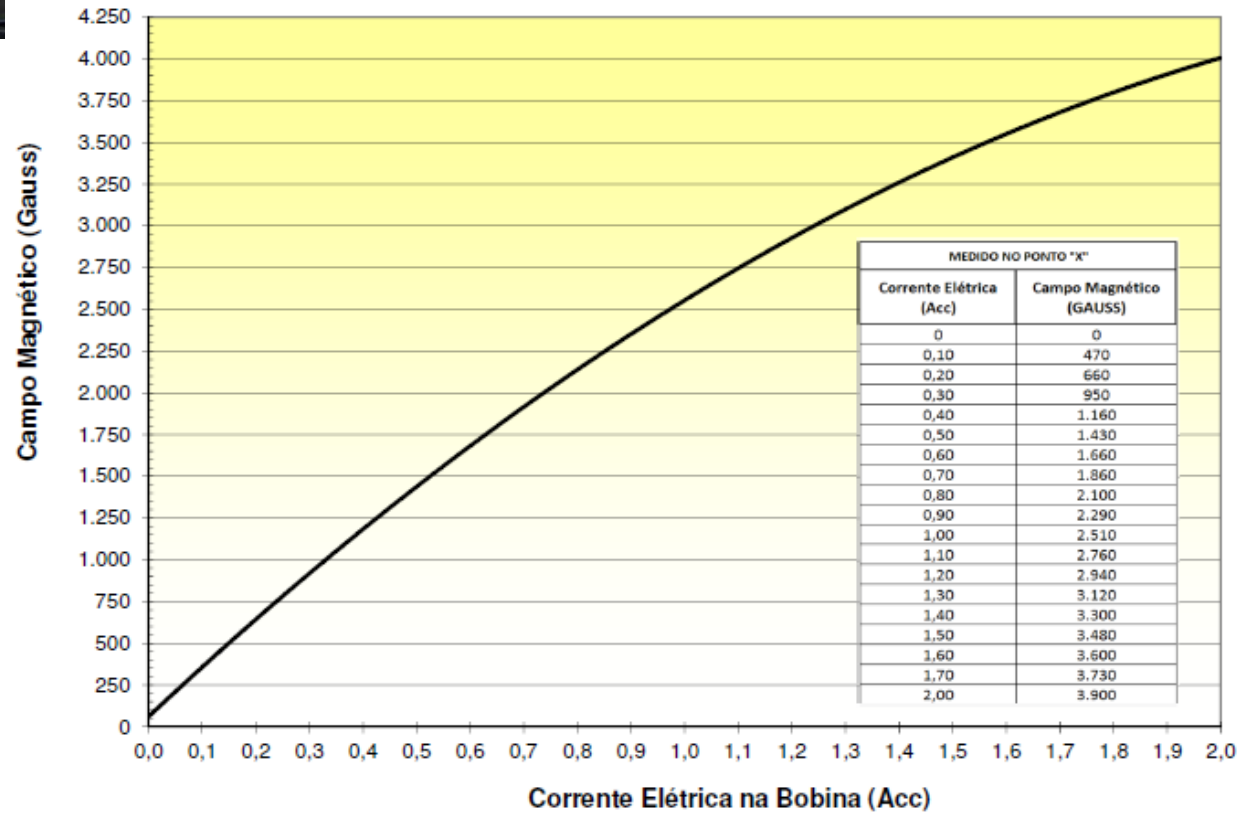
- baseia-se na retenção de espécies minerais magnéticas a partir de um fluxo de partículas usualmente suspensas em meio aquoso
- as partículas são capturadas ao longo de um tubo disposto entre 2 pólos
- usado para materiais ferromagnéticos e fortemente paramagnéticos.



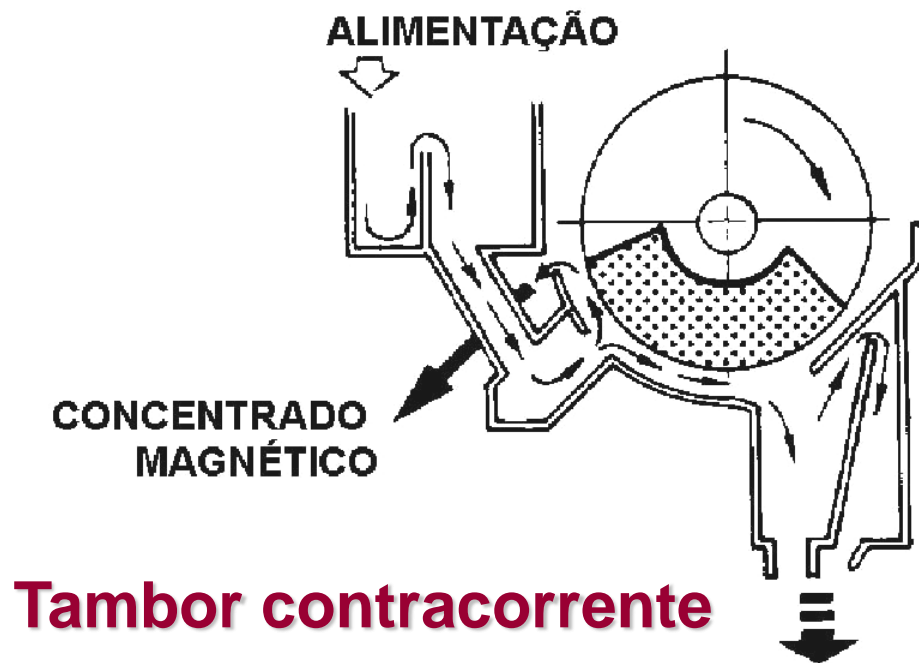
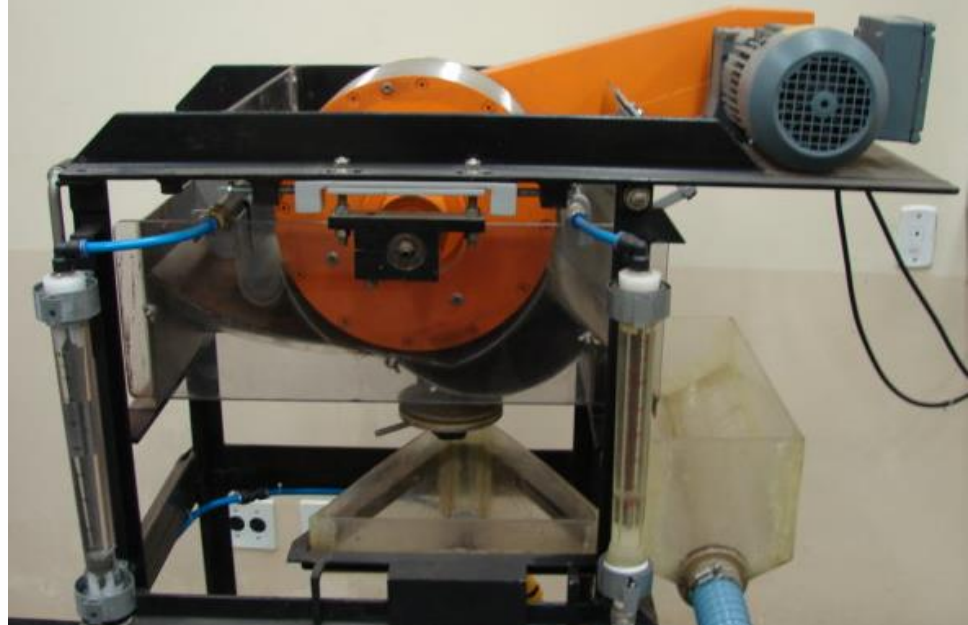
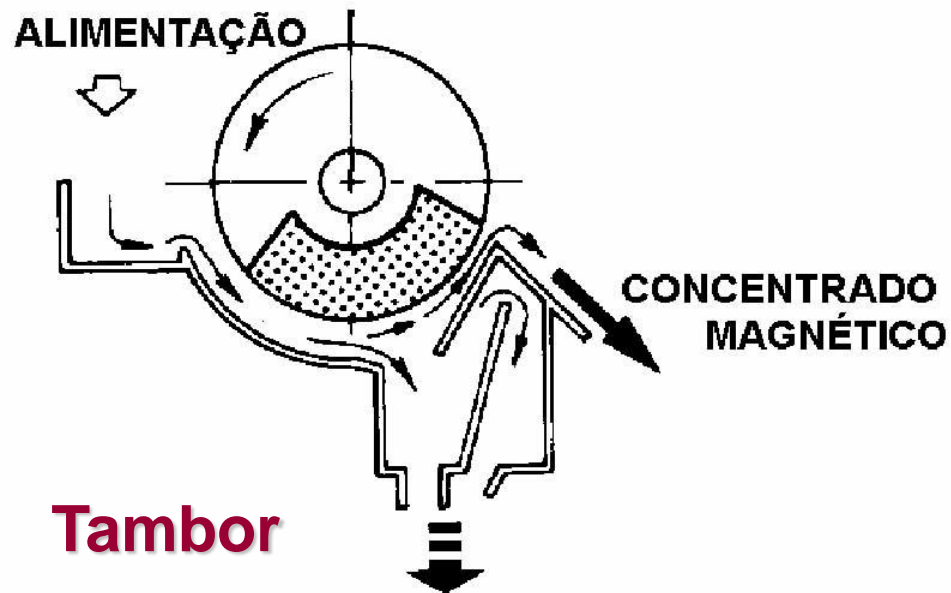


TUBO DAVIS

Gráfico Campo Magnético x Corrente Elétrica



Aula prática



EQUIPAMENTOS DE SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

□ média a alta intensidade de campo:

➤ *operações a seco:*

□ *separador Frantz isodinâmico*

□ *separador Frantz de barreira*

□ *rolo de terras raras (RE-ROLL)*

□ *tambor de terras raras*

□ *outros separadores com campo gerado por bobinas eletromagnéticas*



Frantz isodinâmico



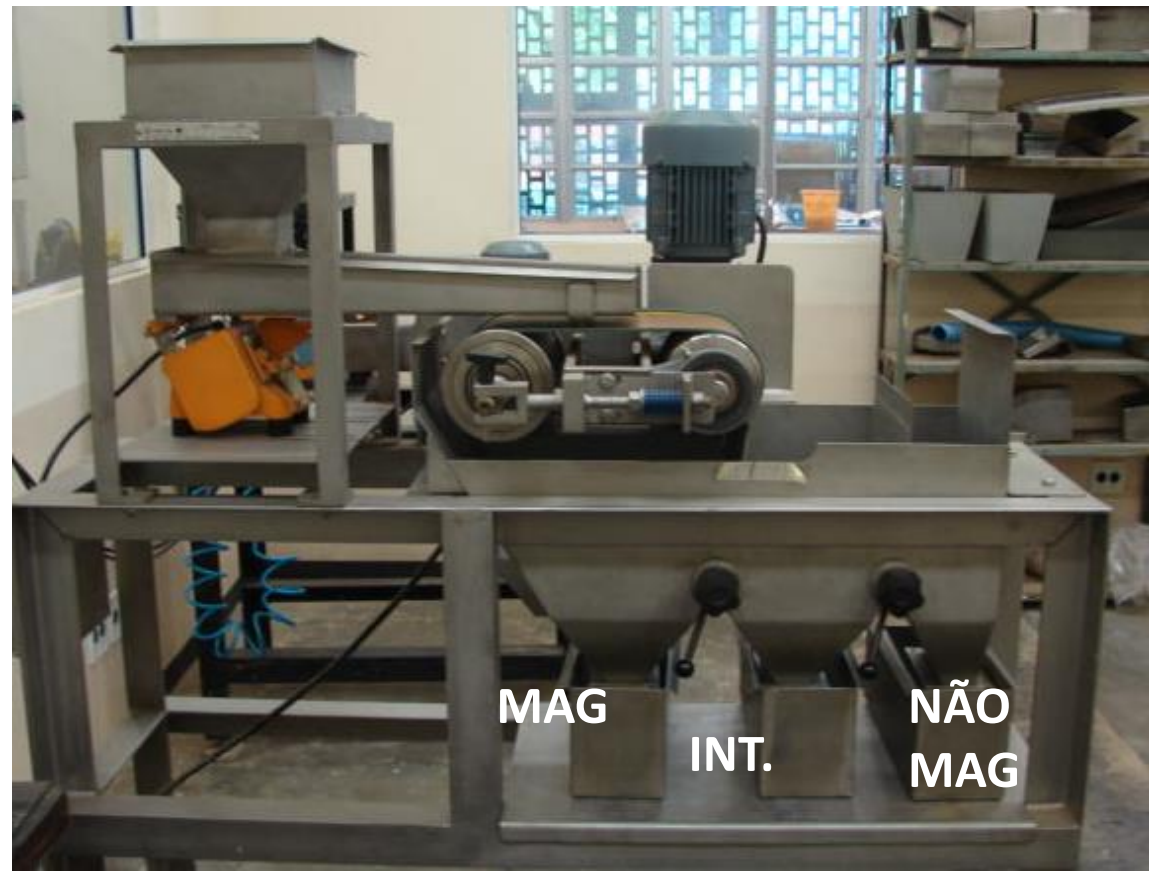
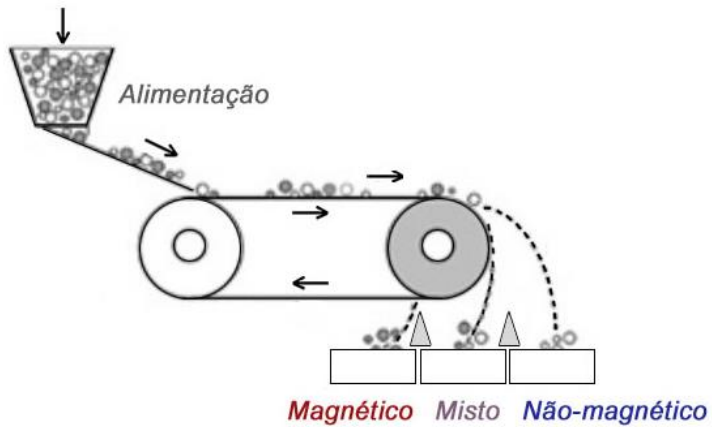
Frantz de barreira



**Rolos de terras raras
RE-ROLL**

Separadores com ímãs de terras raras

Re-Roll



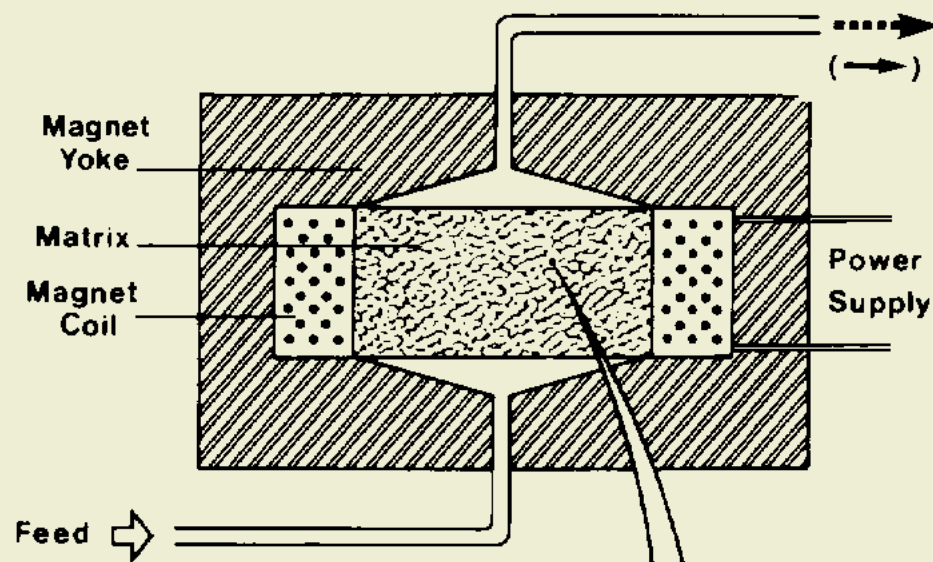
Separadores com ímãs de terras raras

Tambores a seco

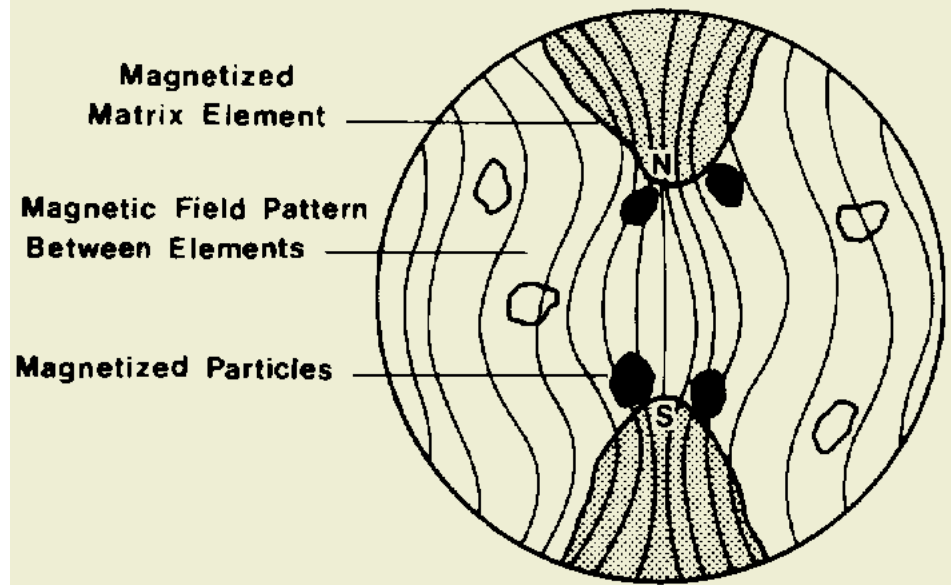


EQUIPAMENTOS DE SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

- média a alta intensidade de campo:
 - *operações a úmido :*
 - *alta intensidade via úmida (WHIMS)*
 - *alto gradiente (HGMS)*
 - *tambor de terras raras*



Alto gradiente (HGMS)





Alta intensidade via úmida (WHIMS)

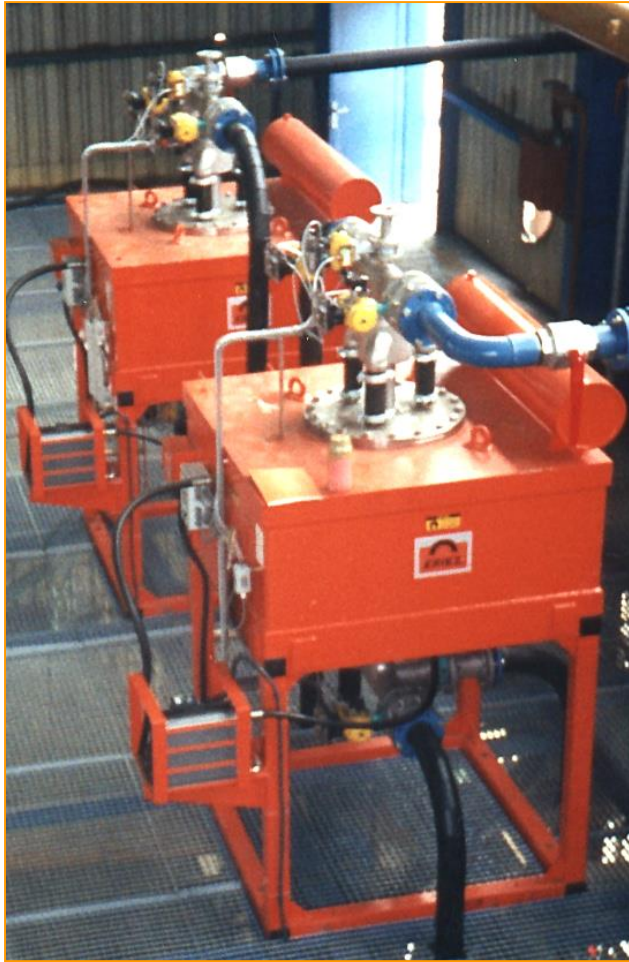


Alto gradiente (HGMS)

WHIMS



Filtro de alta intensidade (High Intensity Magnetic Filters)

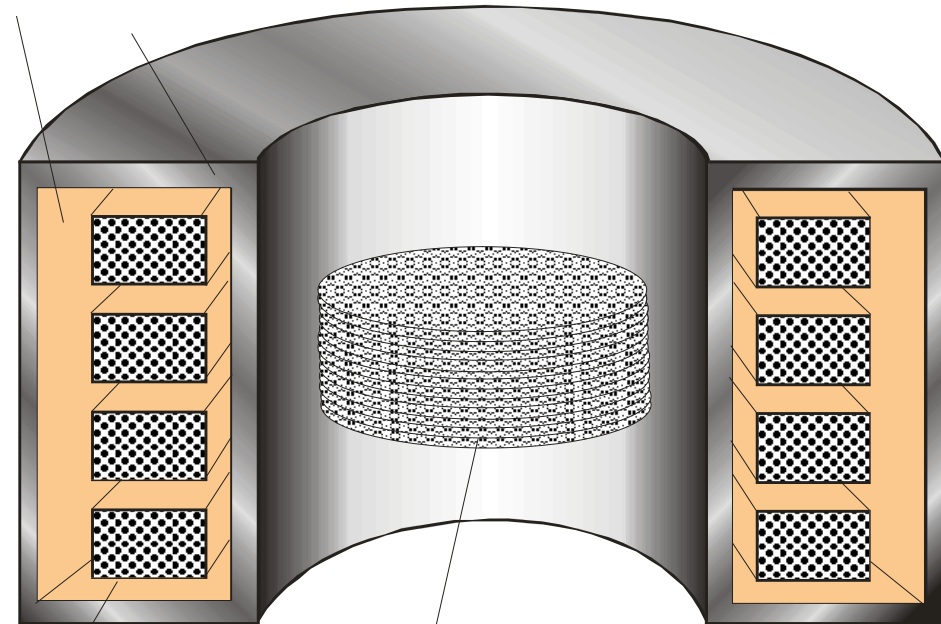


Óleo
refrigeração

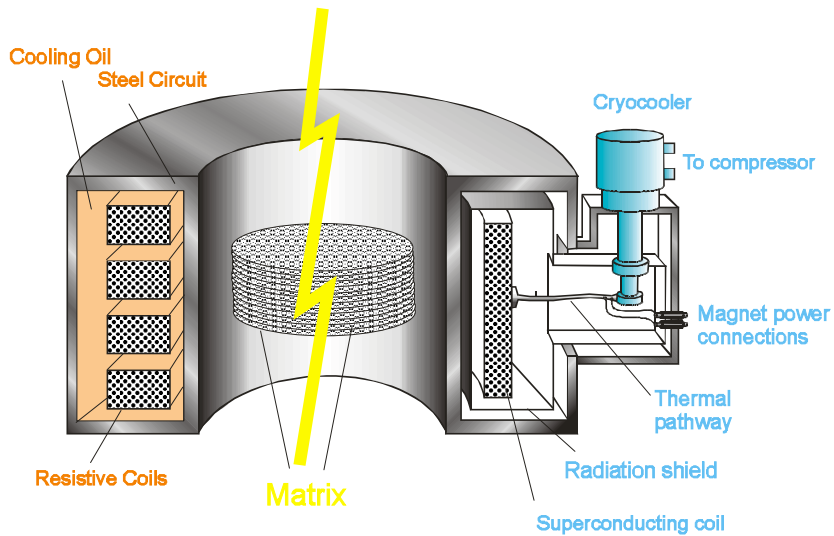
Circuito
em aço

Bobinas

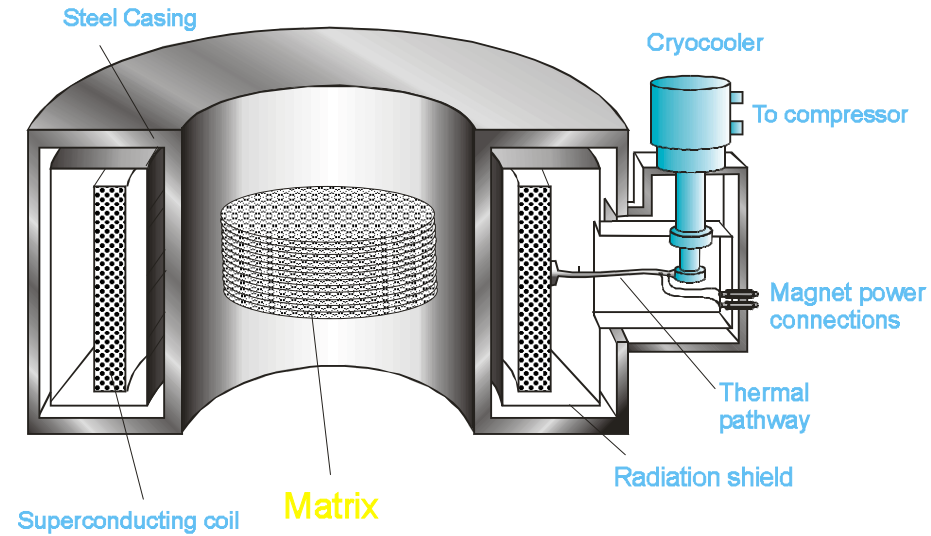
matriz



HGMS Criogênico (He líquido)



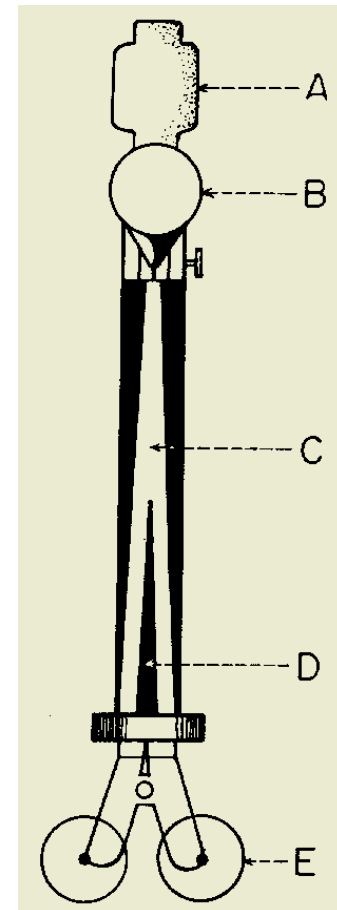
bobina convencional até 25 kG



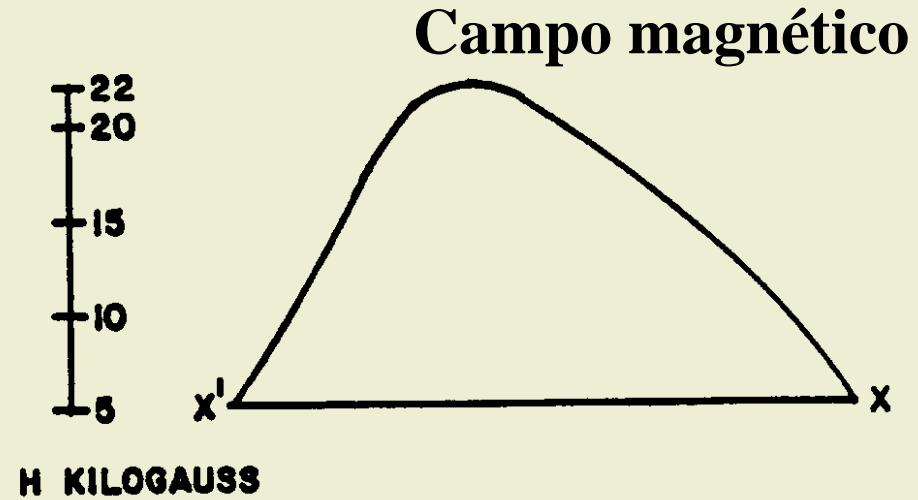
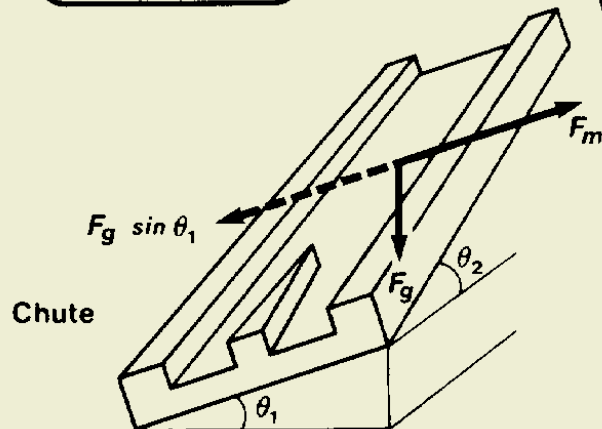
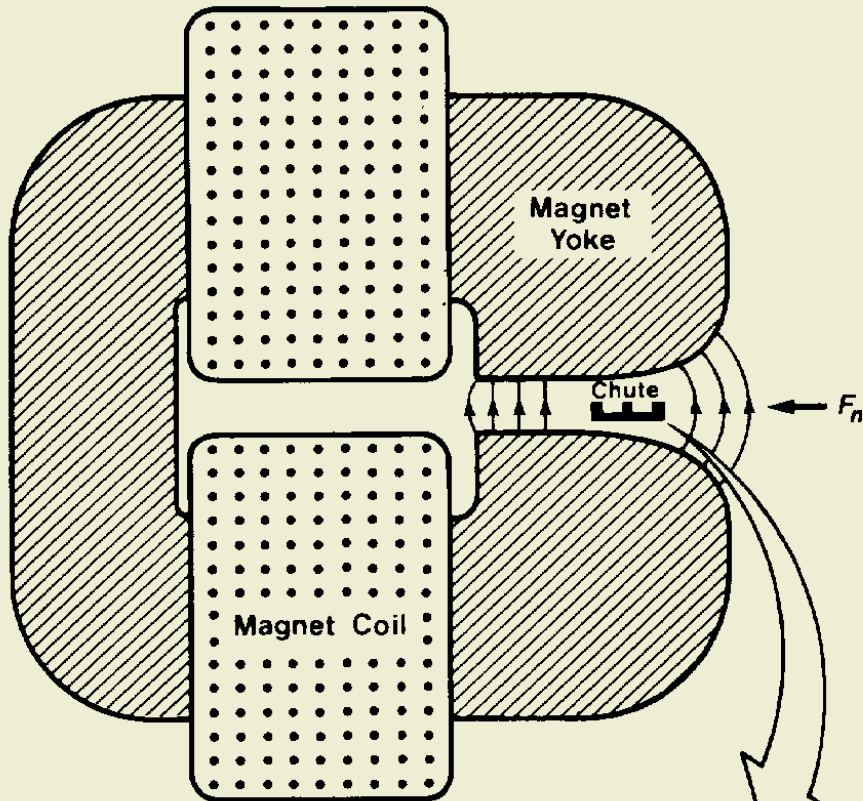
Nb_3Sn - bobina de material supercondutor 15 a 20kG

SEPARADOR MAGNÉTICO ISODINÂMICO FRANTZ

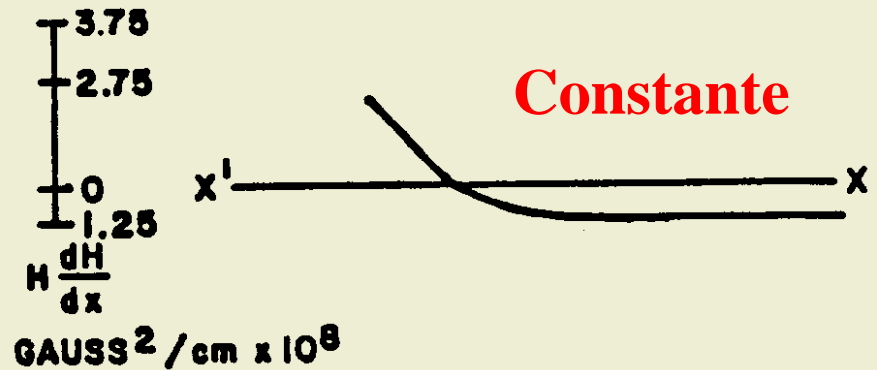
- equipamento de separação magnética mais utilizado em estudos de caracterização
- granulação entre 0,6 e 0,04 mm



Separador magnético isodinâmico Frantz



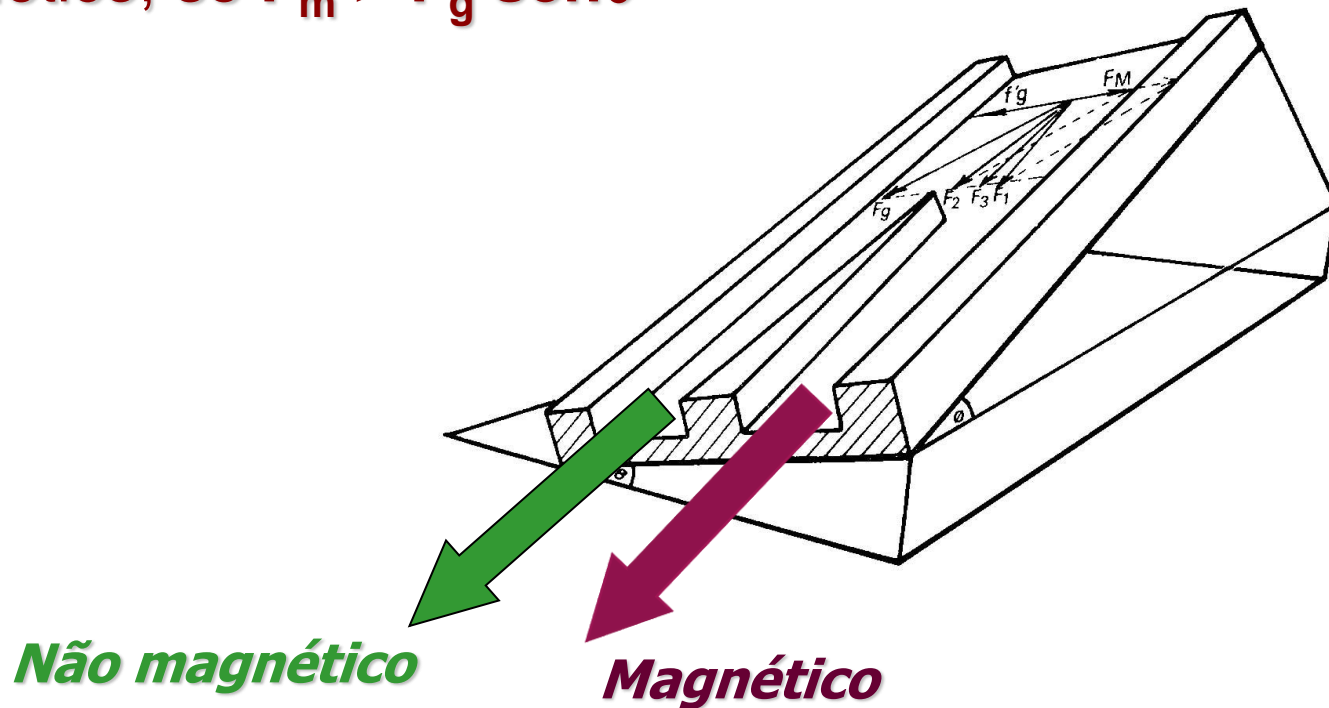
Gradiente de campo magnético



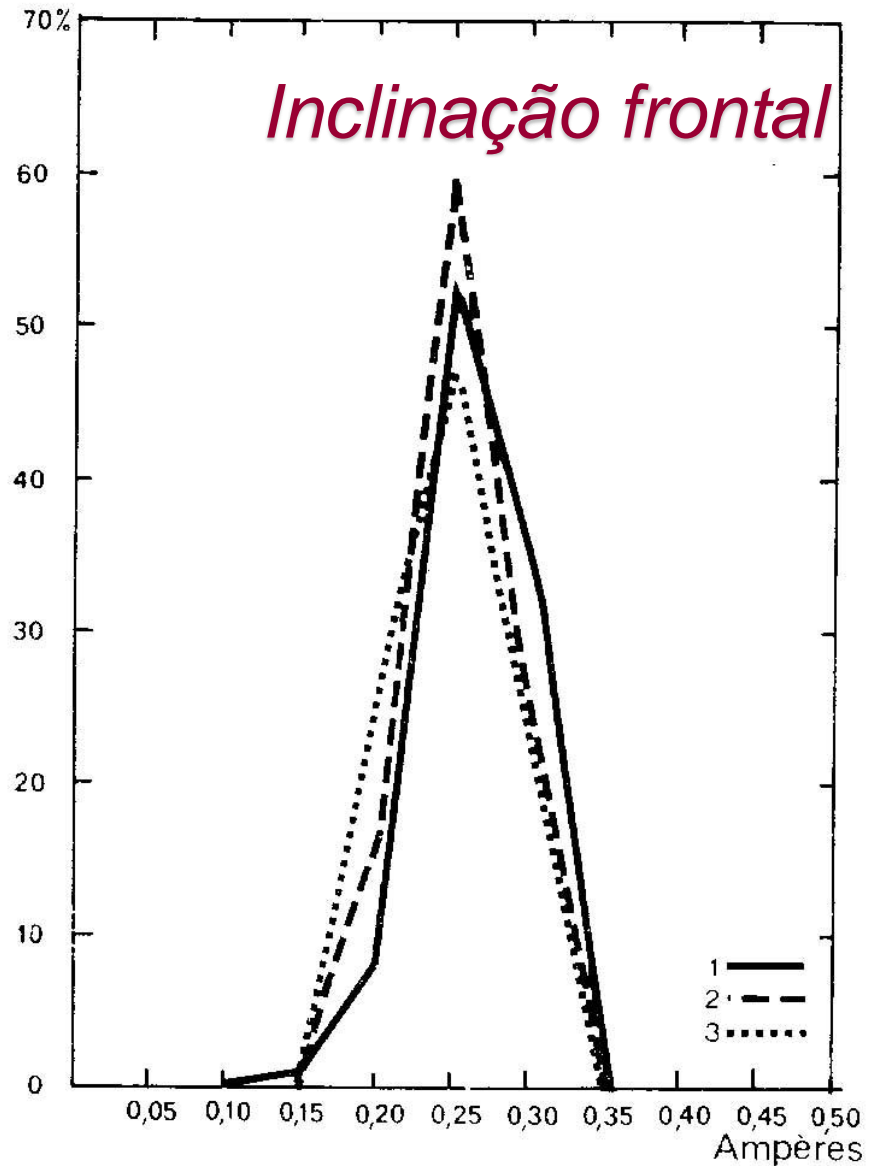
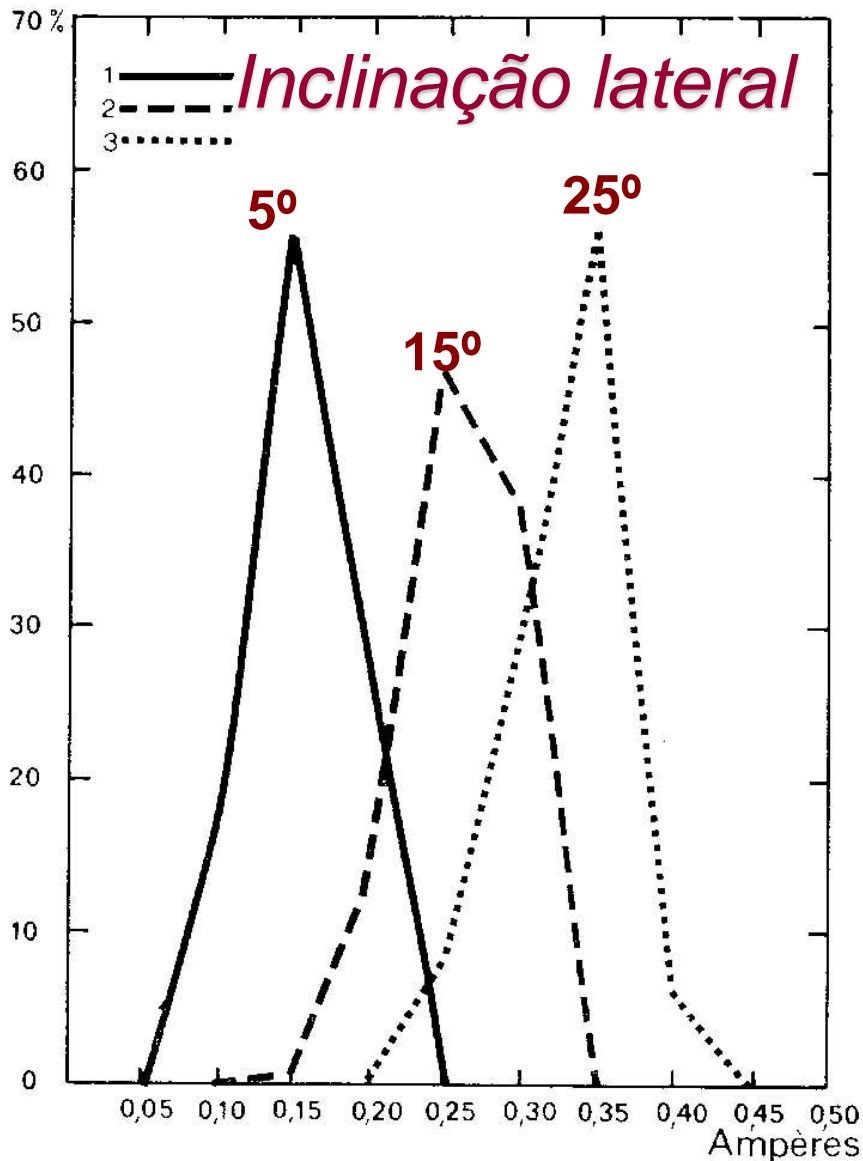
Separador magnético isodinâmico Frantz

Não magnético, se $F_m < F_g \text{ sen}\theta$

Magnético, se $F_m > F_g \text{ sen}\theta$



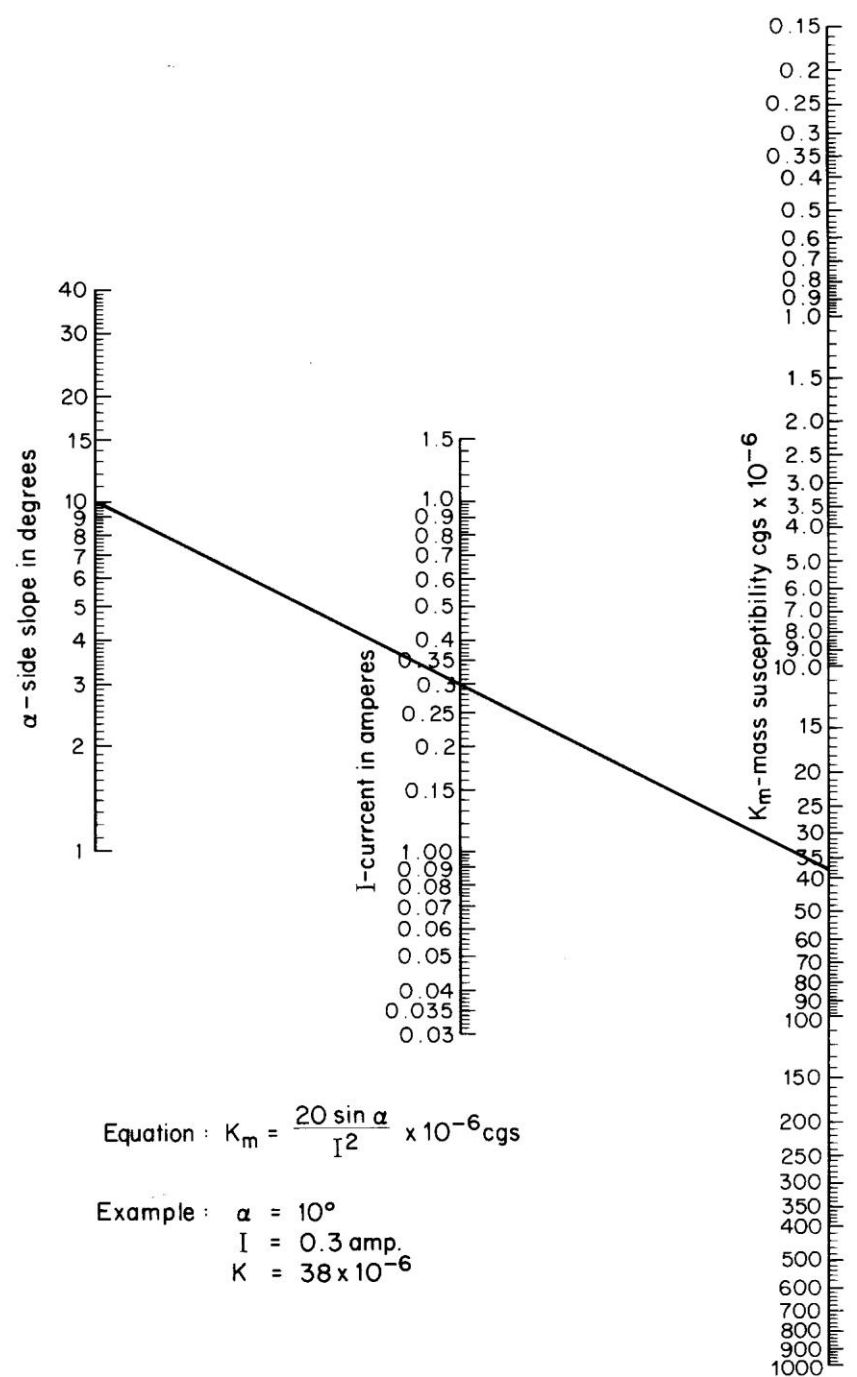
Separador magnético isodinâmico Frantz



**Separador
magnético
isodinâmico
Frantz**

$$X = (20 \sin \theta / I^2) \cdot 10^{-6}$$

X = susceptibilidade magnética



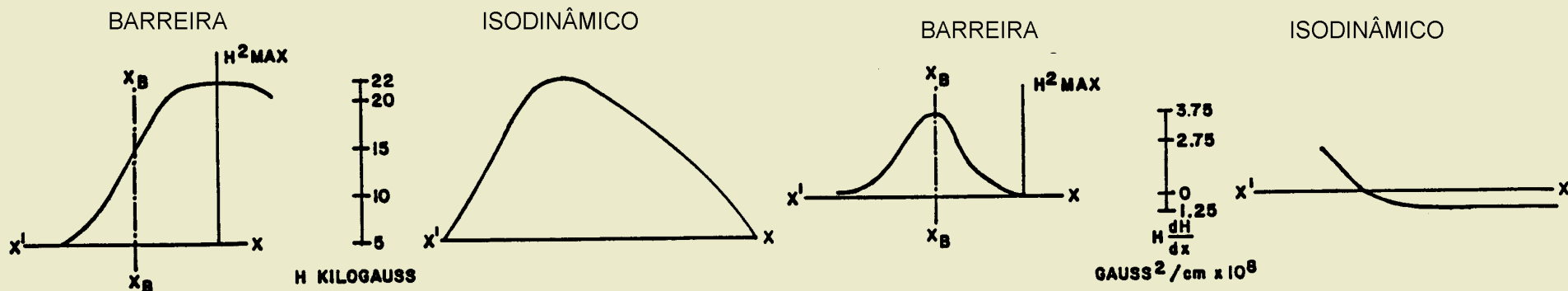
**Separador
magnético
isodinâmico
Frantz**

MINÉRAUX	FRACTION $d > 3,3$										
	Magnétisme										
	0 A	0,1 A	0,2 A	0,3 A	0,4 A	0,5 A	0,6 A	0,8 A	1 A	A max.	Non attirable
Aegyrine											
Allanite											
Anatase											
Anglésite											
Arfvedsonite											
Augite											
Barytine											
Blende											
Brookite											
Cassitérite											
Cérusite											
Chalcopyrite											
Chloritoïde											
Chromite											
Cinabre											
Columbo-tantalite											
Corindon											
Diamant											
Diopside-hedenbergite											
Disthène											
Épidote											
Euxénite											
Fergusonite											
Galène											
Grenats											
Hématite											
Hornblendes											
Hypersthène											
Ilménite											
Leucocène											
Limonite											
Magnétite											
Marcasite											
Marlité											
Mispickel											
Molybdénite											
Monazite											
Orpiment											
Or											
Oxydes de manganèse											
Péridots											
Platine											
Pyrite											
Pyrite oxydée											
Pyrochlore											
Pyromorphite											
Pyrrhotine											
Riebeckite											
Rutile											
Scheelite											
Sidérose											
Sphène											
Spinelles											
Spinelles chromifères											
Spinelles verts											
Staurolite											
Stibine											
Thorite											
Titanomagnétite											
Topaze											
Wolfram											
Xénotime											
Zircon											

SEPARADOR MAGNÉTICO FRANTZ DE BARREIRAS



- mostra desenho de equipamento e características de operação similares ao separador isodinâmico;
- no entanto apresenta **gradiente de campo magnético mais elevado** possibilitando a separação de materiais diamagnéticos;
- **granulação 2 a 0,02mm;**
- **maior taxa de alimentação.**



Campo magnético (H)

Gradiente de campo magnético

SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA

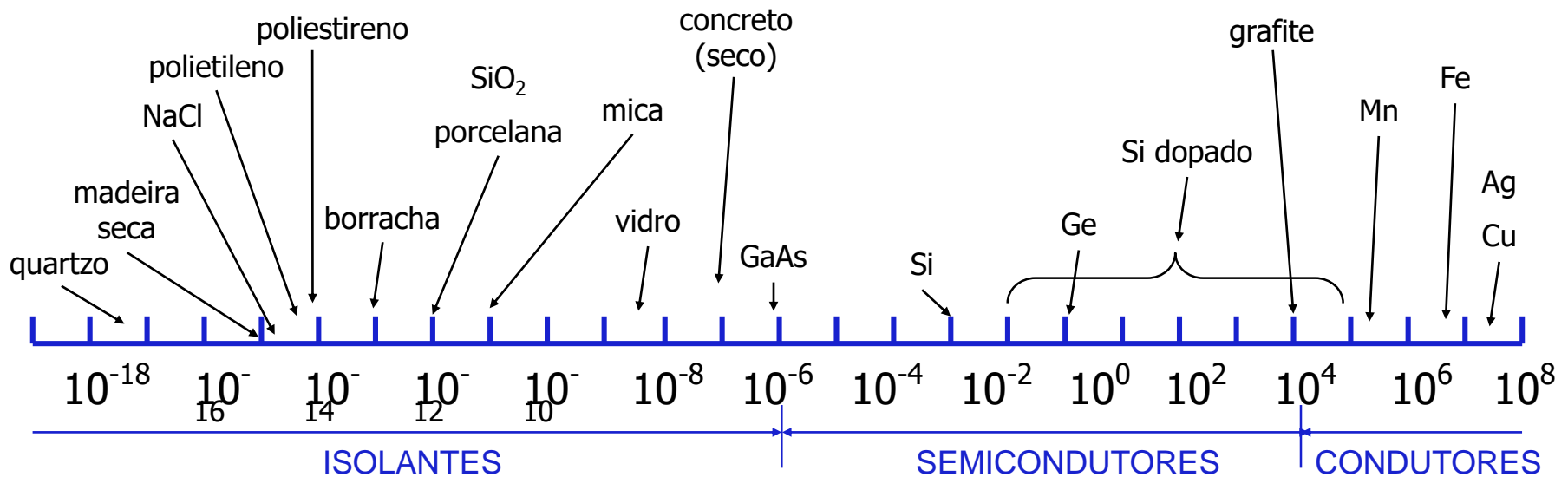
- ***condutibilidade elétrica de partículas***
 - ❑ *atração entre materiais com cargas elétricas opostas*
 - ❑ *repulsão para aqueles de mesma carga*
- ***granulação: 0,05 a 3 mm***
- ***fatores interferentes:***
 - *recobrimento superficial*
 - *temperatura:*
 - ❑ ***aumento de condutibilidade com aumento de temperatura;***
 - ❑ *granulometria (etapas de limpeza)*



CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

- Os materiais sólidos podem ser classificados, de acordo com a magnitude de sua condutividade elétrica, em três grupos principais: **CONDUTORES**, **SEMICONDUCTORES** e **ISOLANTES**.

Condutividade σ em $(\Omega.m)^{-1}$ de uma variedade de materiais à temperatura ambiente.





CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

- O **MODELO DOS ELÉTRONS LIVRES** dos metais supõe que o material é composto por um gás de elétrons que se movem num retículo cristalino formado por íons pesados. Esse modelo prevê corretamente a forma funcional da lei de Ohm. No entanto, ele prevê incorretamente os valores observados experimentalmente para a condutividade elétrica.

Por exemplo, para o cobre temos:

$$\sigma_{\text{calculado}} = 5,3 \times 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1} \quad \text{e} \quad \sigma_{\text{experimental}} = 59 \times 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}.$$

- Para uma compreensão aprofundada das propriedades elétricas dos materiais necessitamos considerar o caráter ondulatório dos elétrons e fazer uso de conceitos da mecânica quântica, mas isto está além do escopo desta disciplina.
- Na aula de hoje, explicaremos a condutividade elétrica dos materiais utilizando, de forma simplificada, alguns conceitos provindos da mecânica quântica. Em particular, consideraremos o **MODELO DE BANDAS DE ENERGIA ELETRÔNICA NOS SÓLIDOS**.



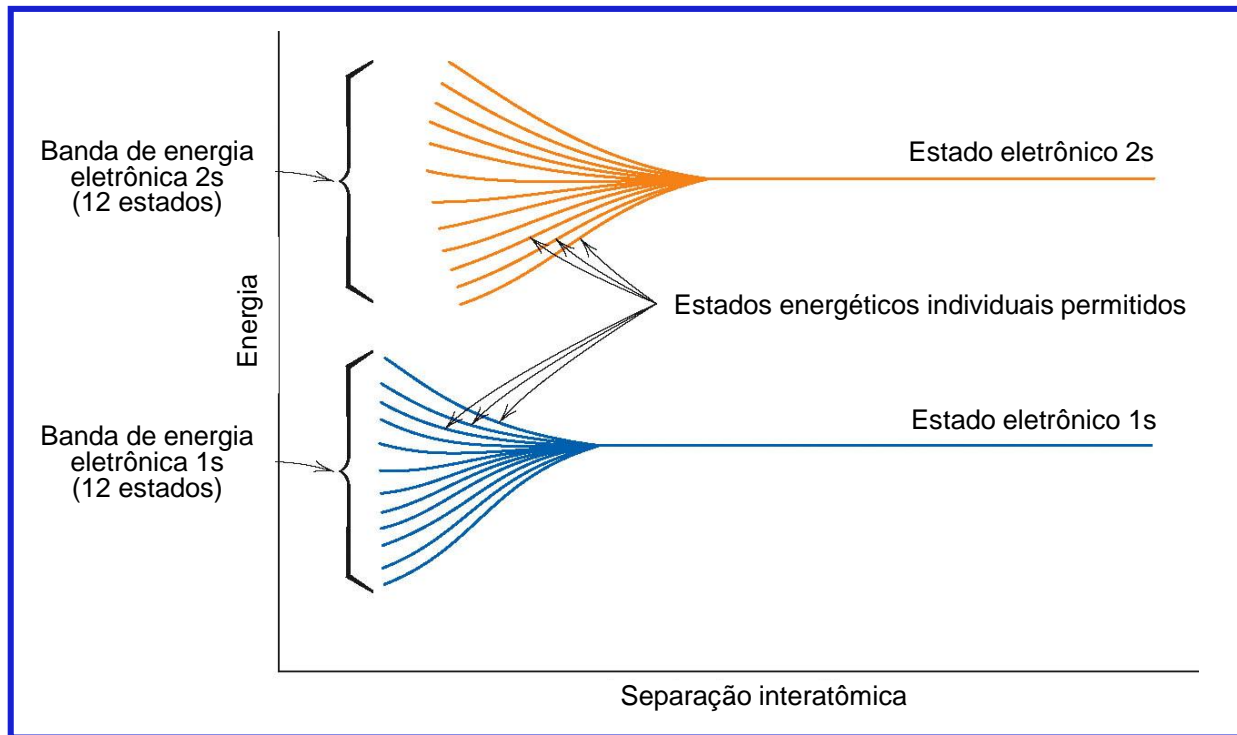
BANDAS DE ENERGIA NOS SÓLIDOS

- Considere um conjunto de N átomos. A distâncias de separação relativamente grandes, cada átomo é independente de todos os demais, e tem os níveis de energia atômica e a configuração eletrônica que teria se estivesse isolado. Contudo, à medida que esses átomos se aproximam uns dos outros, os elétrons sentem a ação dos elétrons e núcleos dos átomos adjacentes ou são perturbados por eles. Essa influência é tal que cada estado atômico distinto pode se dividir em uma série de estados eletrônicos proximamente espaçados no sólido, para formar o que é conhecido por **BANDA DE ENERGIA ELETRÔNICA**.
- A extensão da divisão depende da separação interatômica e começa com as camadas eletrônicas mais externas, uma vez que elas são as primeiras a serem perturbadas quando os átomos coalescem.
- Dentro de cada banda, os estados de energia são discretos, embora a diferença de energia entre os estados adjacentes seja excessivamente pequena.



BANDAS DE ENERGIA NOS SÓLIDOS

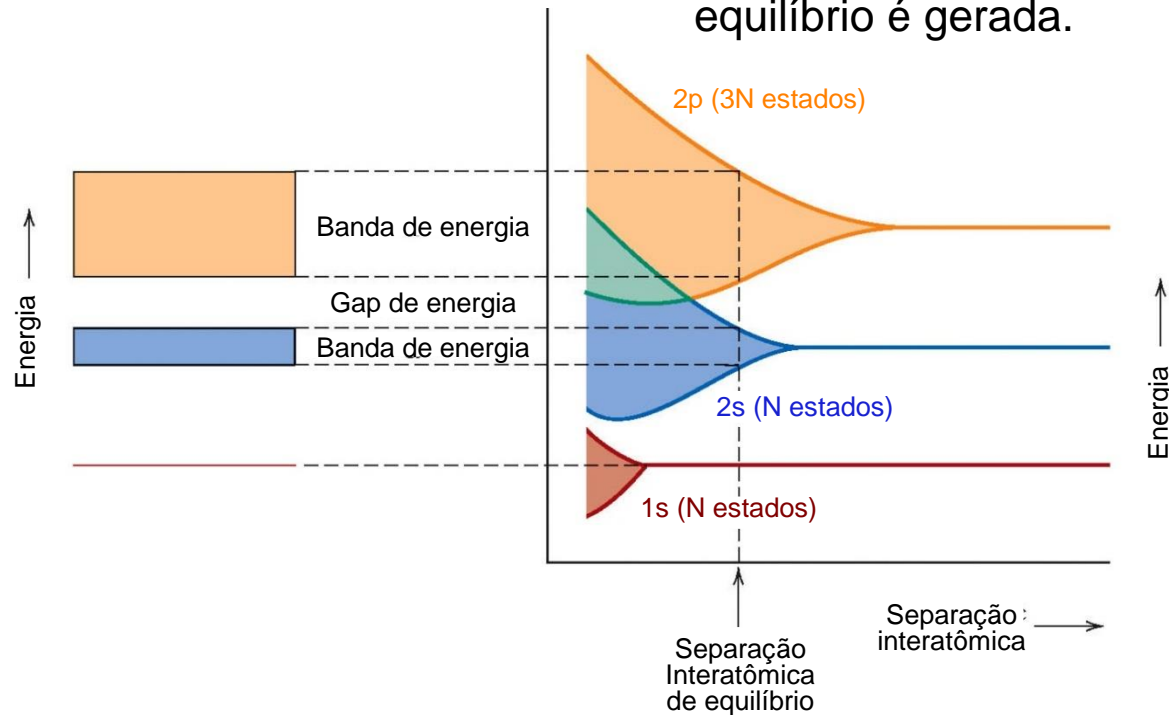
- Gráfico esquemático da energia eletrônica em função da separação interatômica para um agregado de 12 átomos ($N = 12$). Com a aproximação cada um dos estados atômicos 1s e 2s se divide para formar uma banda de energia eletrônica que consiste em 12 estados. Cada estado de energia é capaz de acomodar dois elétrons que devem possuir spins com sentidos opostos.





BANDAS DE ENERGIA NOS SÓLIDOS

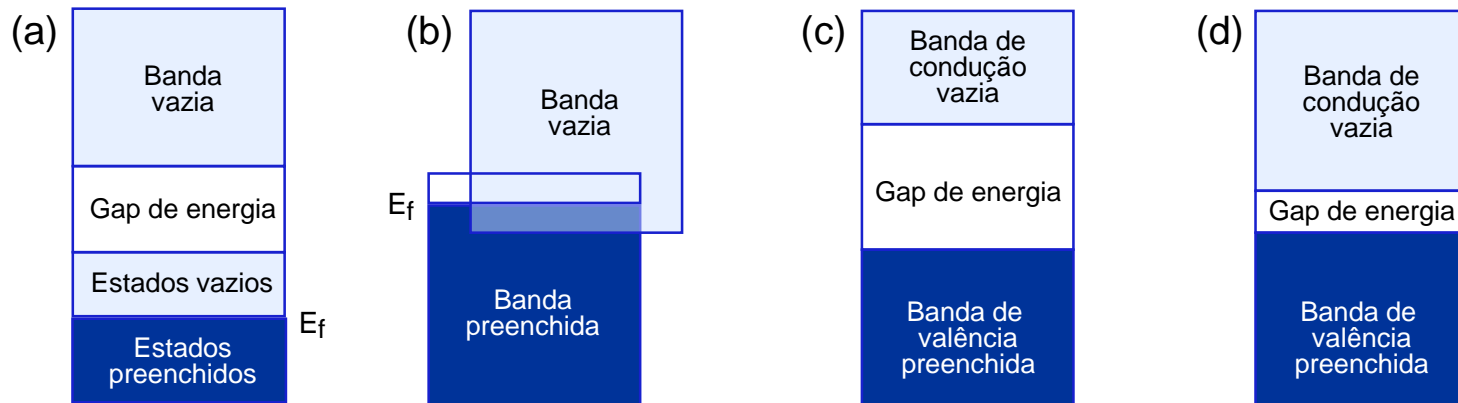
- Bandas de energia eletrônica para um material sólido formado por N átomos.
 - ✓ Representação convencional da estrutura da banda de energia eletrônica para um material sólido na separação interatômica de equilíbrio.
 - ✓ Energia eletrônica em função da separação interatômica para um agregado de N átomos, ilustrando como a estrutura da banda de energia na separação interatômica de equilíbrio é gerada.





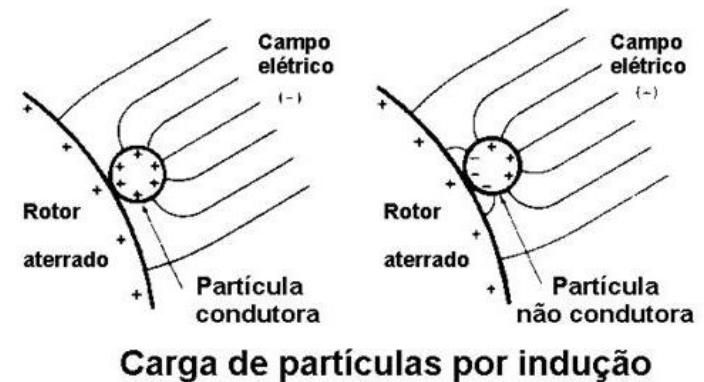
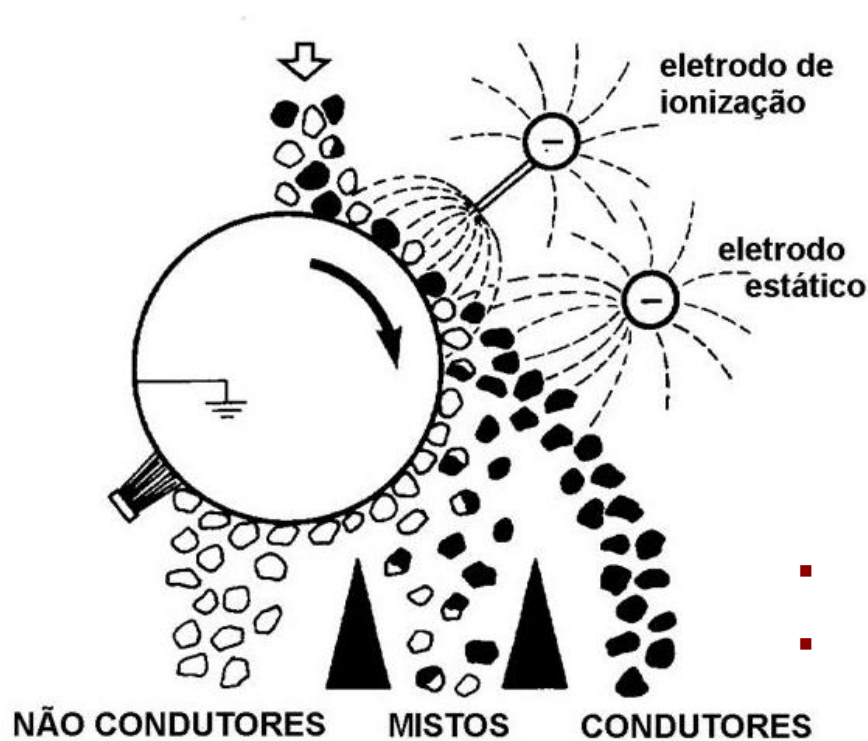
ESTRUTURAS DE BANDAS DE ENERGIA NOS SÓLIDOS

Estruturas de bandas de energia possíveis para sólidos a 0 K.



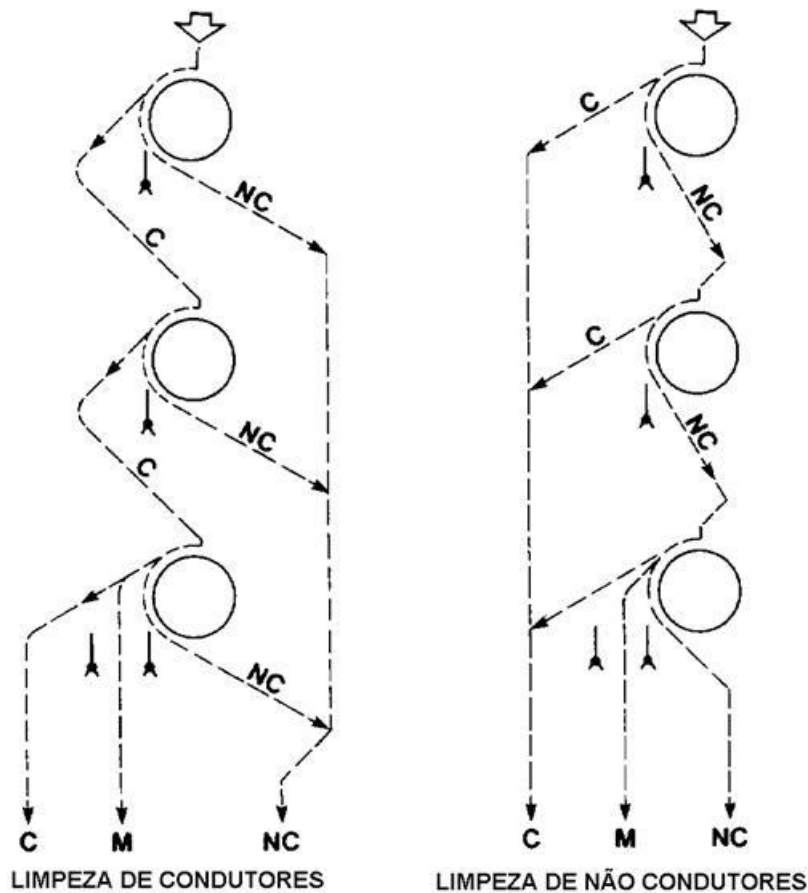
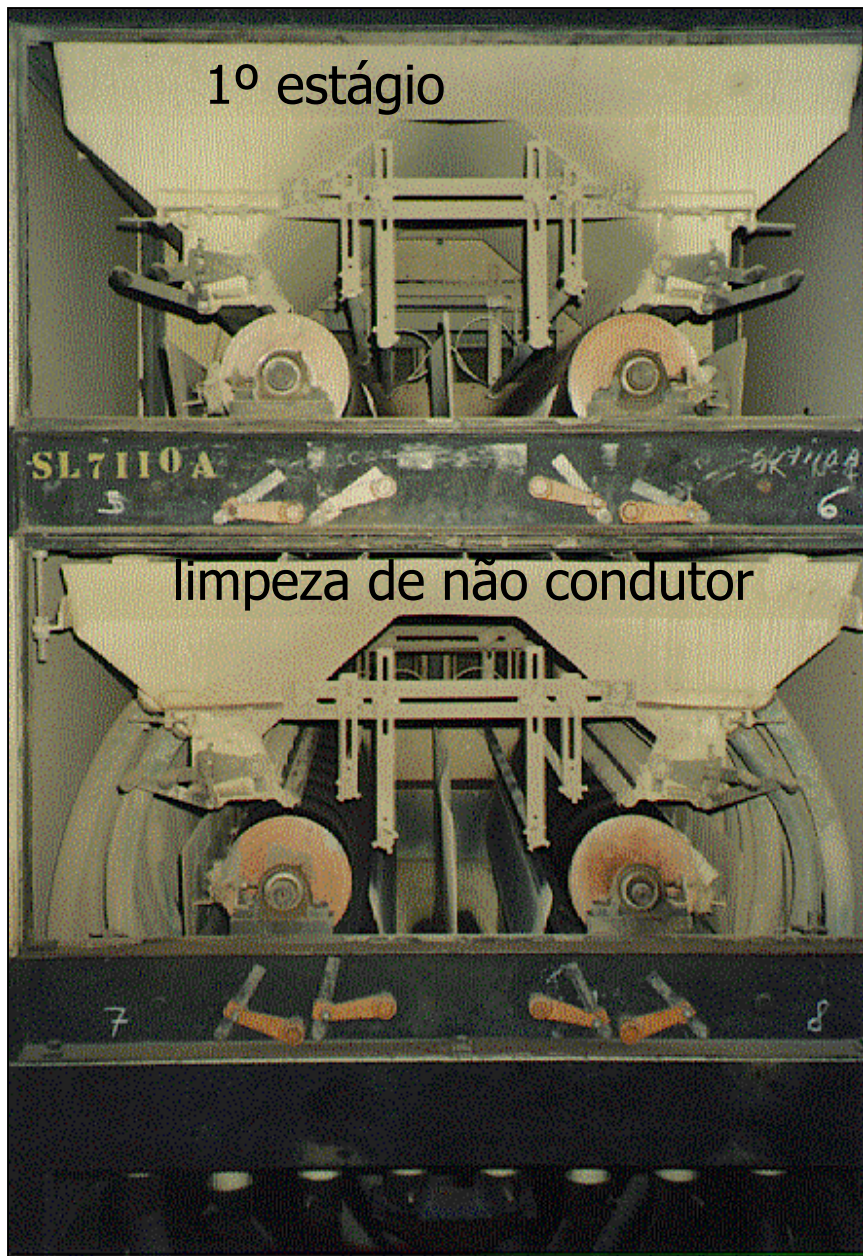
- (a) Bandas de energia de **METAIS** tais como o cobre ($Z = 29, \dots 3d^{10} 4s^1$) nos quais se encontram disponíveis, **na mesma banda de energia, estados eletrônicos não preenchidos acima e adjacentes a estados eletrônicos preenchidos.**
- (b) Bandas de energia de **METAIS** tais como o magnésio ($Z = 12, 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$) nos quais ocorre a superposição das bandas de energia mais externas, a preenchida e a não-preenchida.
- (c) Bandas de energia típicas de **ISOLANTES**: a BANDA DE VALÊNCIA (banda de energia preenchida) é separada da BANDA DE CONDUÇÃO (banda de energia não-preenchida) por um **GAP DE ENERGIA** (banda de energia proibida, ou seja, barreira de energia) de largura relativamente grande (>2 eV).
- (d) Bandas de energia de **SEMICONDUCTORES**: a estrutura de bandas de energia é semelhante à dos isolantes, mas com gaps de energia de larguras menores (<2 eV).

Separador eletrodinâmico - alta tensão



- eletrodo de ionização (20 a 40 kV);
- **partículas condutoras perdem rapidamente a carga induzida para o rolo aterrado e caem em queda livre com uma trajetória determinada pela velocidade periférica do rolo;**
- **partículas não condutoras retêm a carga induzida, aderindo à superfície do rolo.**

SEPARADOR ELETRODINÂMICO ALTA TENSÃO

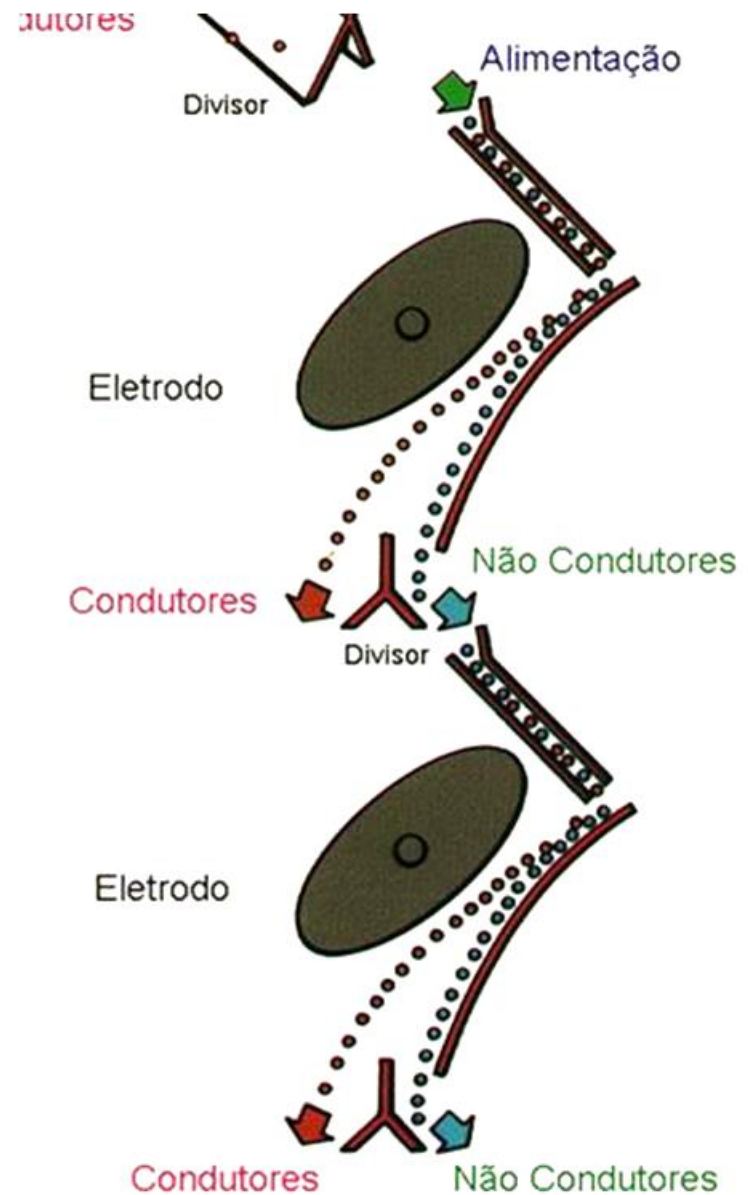
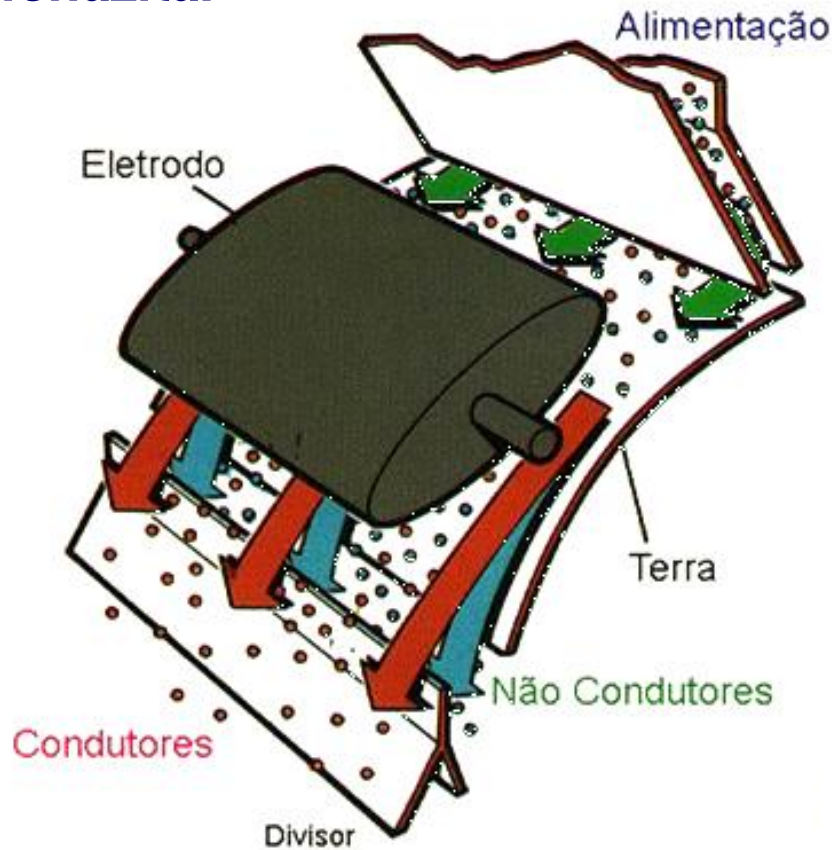


configurações

SEPARADOR DE PLACAS

□ Limpeza de não condutores:

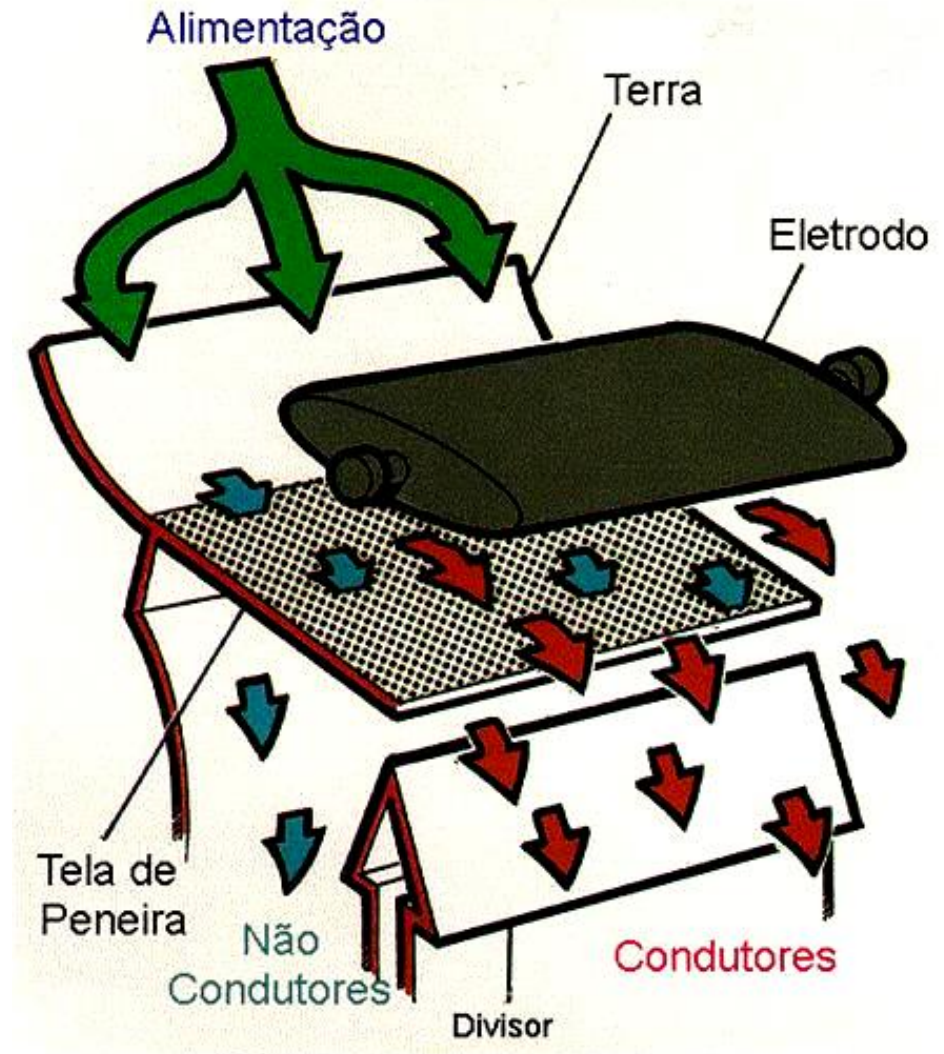
- zircão;
- cianita;
- monazita.



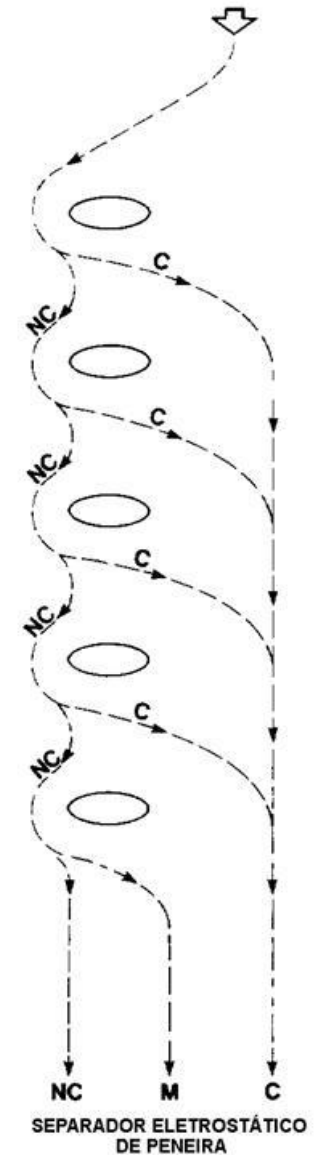
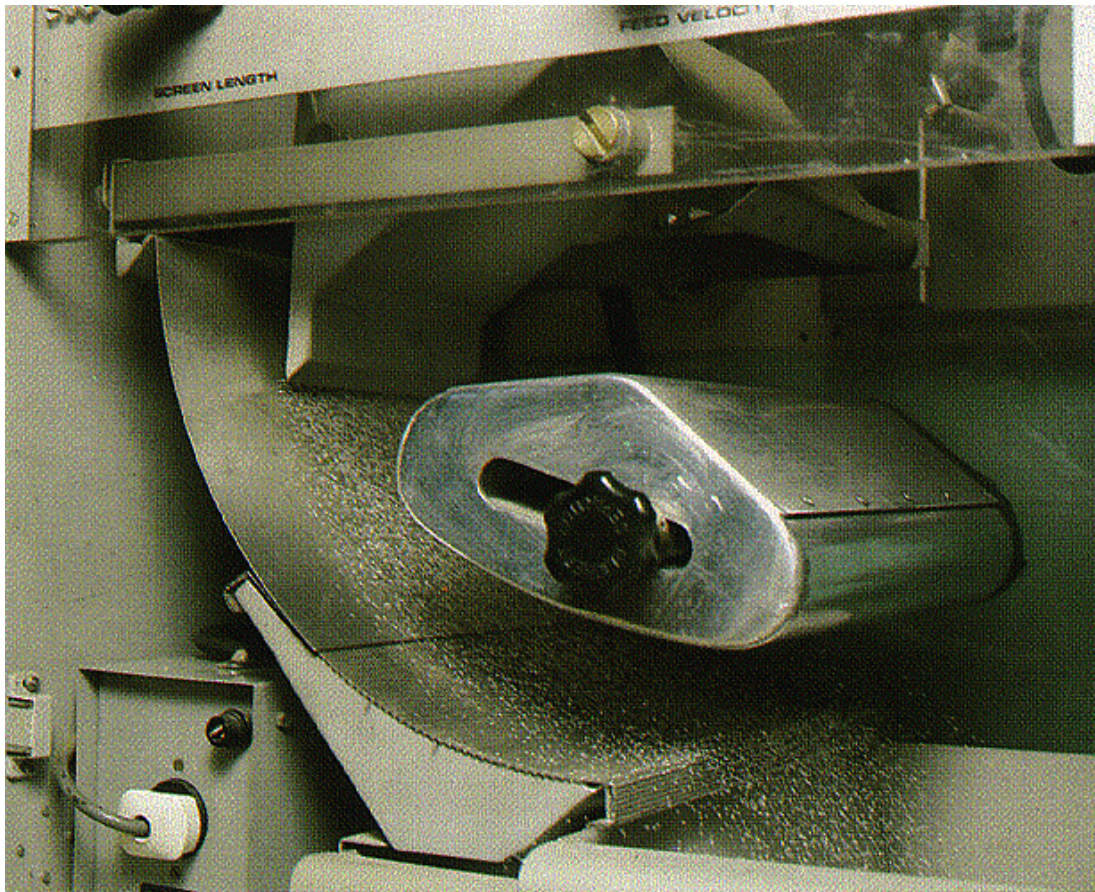
SEPARADOR ELETROSTÁTICO DE TELA

□ *Limpeza de condutores:*

- *ilmenita*
- *rutilo*



SEPARADOR DE TELA



FLOTAÇÃO

- **baseia-se nas diferenças das propriedades físico-químicas entre as superfícies dos minerais;**
- **estas são dependentes da natureza e da força de ligação entre os seus átomos, íons ou moléculas constituintes.**

FLOTAÇÃO POR ESPUMA

- **separação efetuada numa suspensão aquosa;**
- **diferenciação entre as espécies minerais é dada pela capacidade de suas partículas se prenderem a bolhas de gás (geralmente ar);**
- **em função do número de bolhas captado, a densidade do conjunto partícula-bolhas torna-se menor que a do meio, deslocando-se então para a superfície.**

FLOTAÇÃO POR ESPUMA

□ *hidrofobicidade:*

- *propriedade que determinadas espécies minerais têm de apresentar maior afinidade pela fase gasosa do que pela líquida;*

□ *hidrofilicidade:*

- *propriedade que determinadas espécies minerais possuem de apresentar maior afinidade pela fase líquida do que pela gasosa;*

□ ambos os comportamentos podem ser seletivamente modificados pela adição de substâncias apropriadas à polpa.

FLOTAÇÃO - REAGENTES

- ❑ ***modificadores***
- ❑ ***coletores (catiônicos ou aniônicos);***
 - ❑ *reguladores de pH;*
 - ❑ *depressores;*
 - ❑ *ativadores.*
- ❑ ***espumantes.***

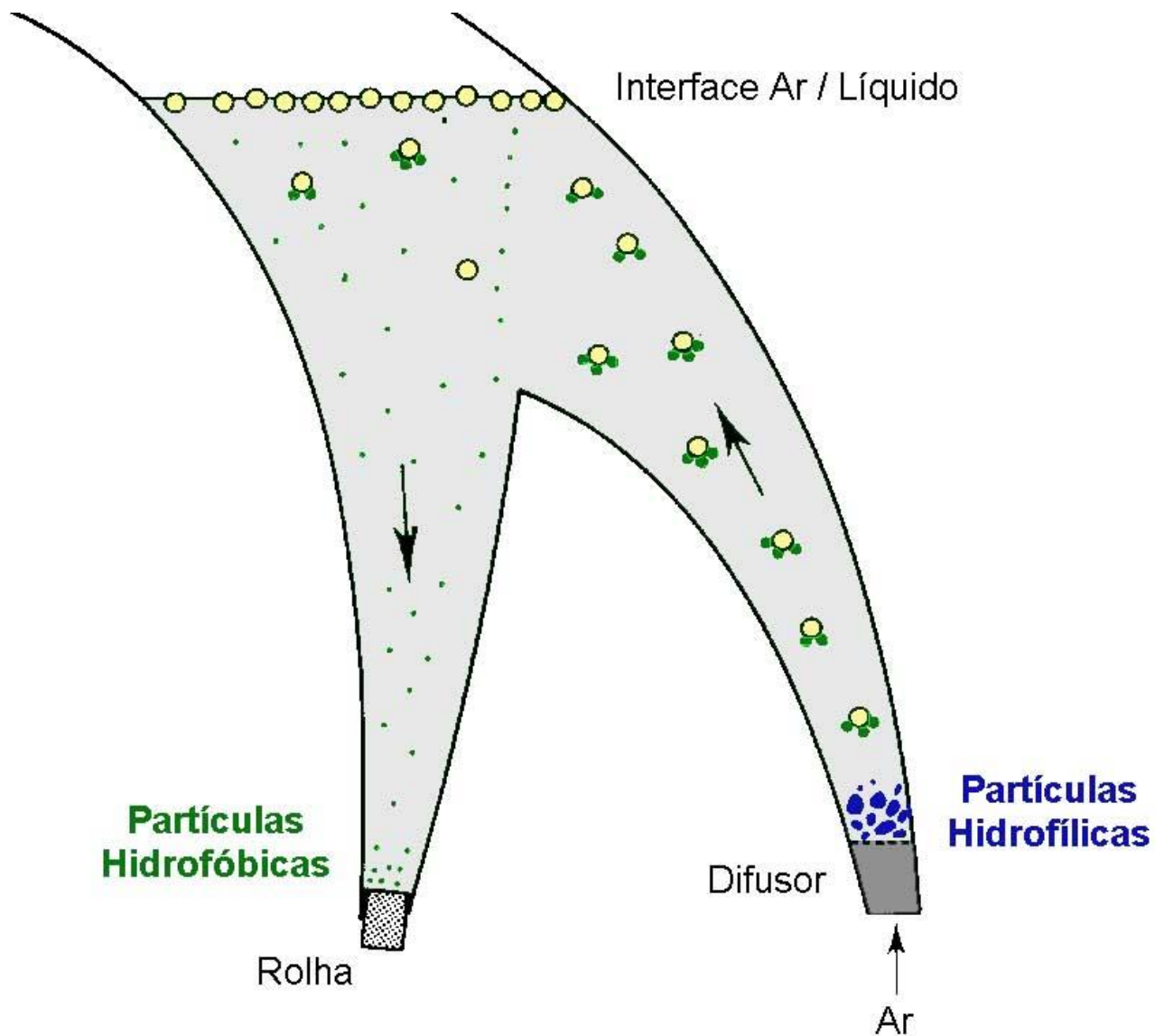
FLOTAÇÃO – PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

- o material a ser processado deve ser previamente cominuído de modo a promover a liberação das espécies minerais presentes;
- a granulometria usual de aplicação situa-se
 - ***entre 0,3 e 0,01 mm - oximinerais (deslamados);***
 - ***abaixo de 0,3mm - sulfetos e metais nativos.***

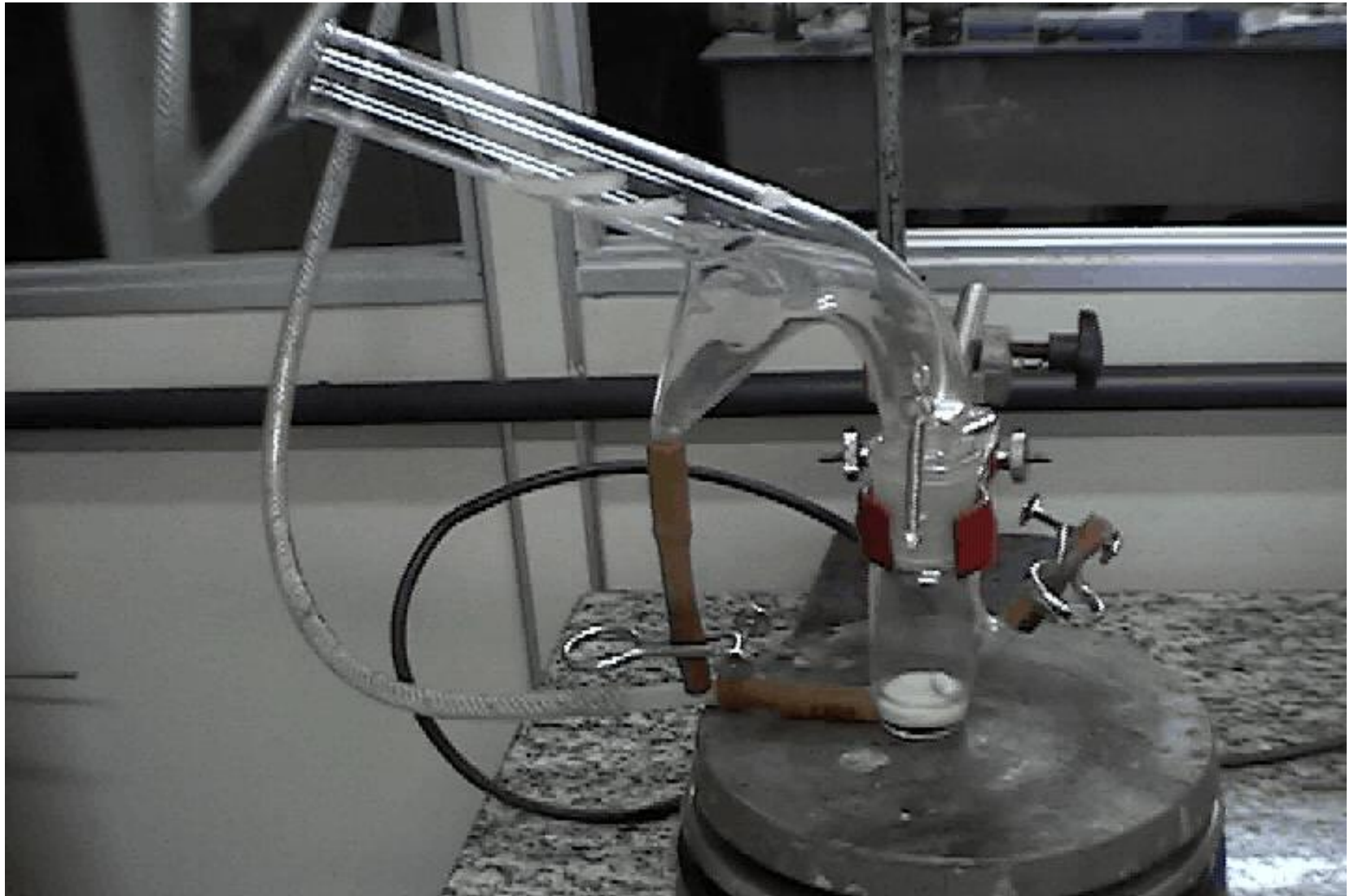
EQUIPAMENTOS DE FLOTAÇÃO

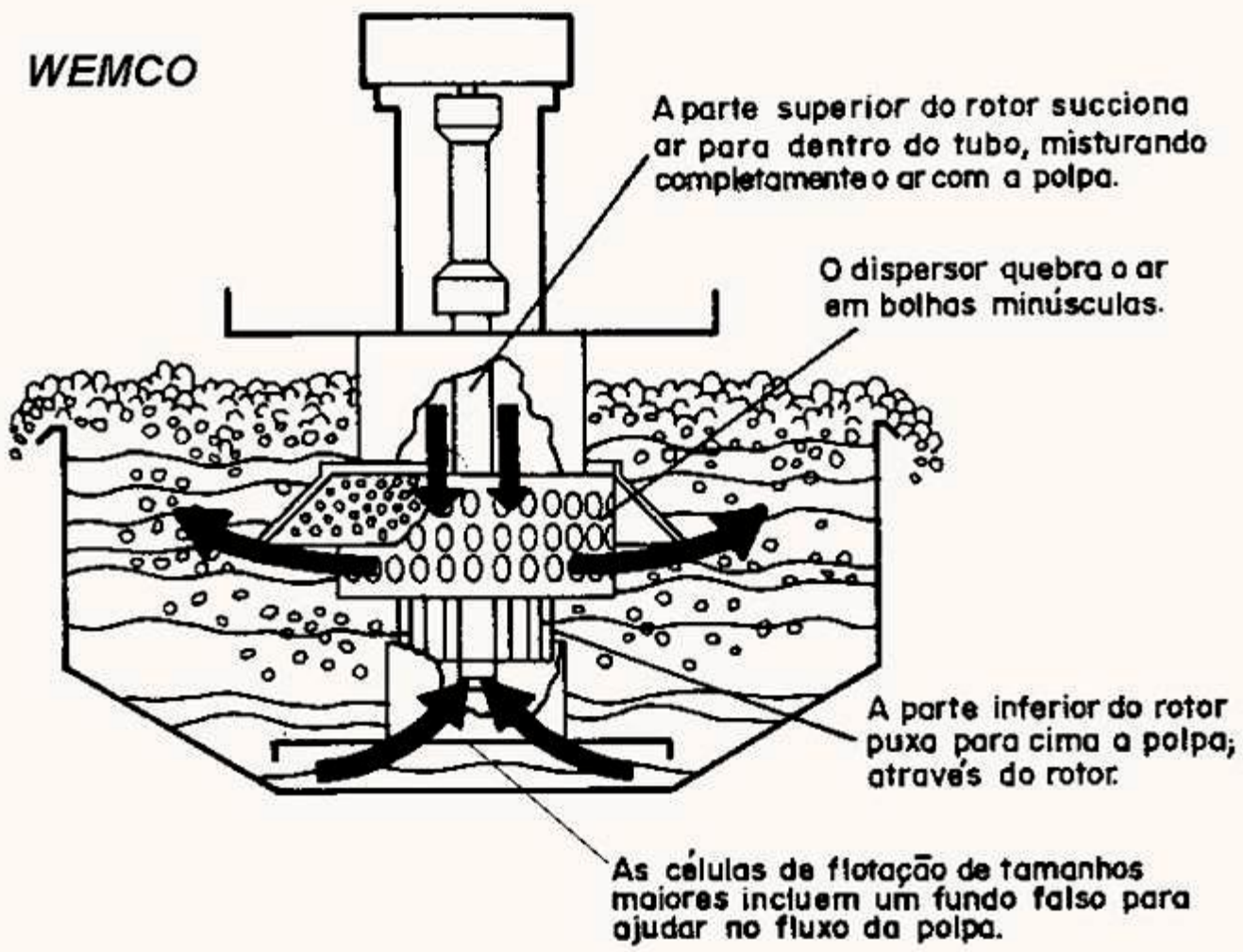
- ❑ ***microflotação (tubo de Hallimond);***
- ❑ ***flotação descontínua em célula mecânica (bancada);***
- ❑ ***flotação em células mecânicas (piloto ou industrial);***
- ❑ ***flotação em células pneumáticas (piloto ou industrial).***

Tubo Hallimond



Tube Hallimond





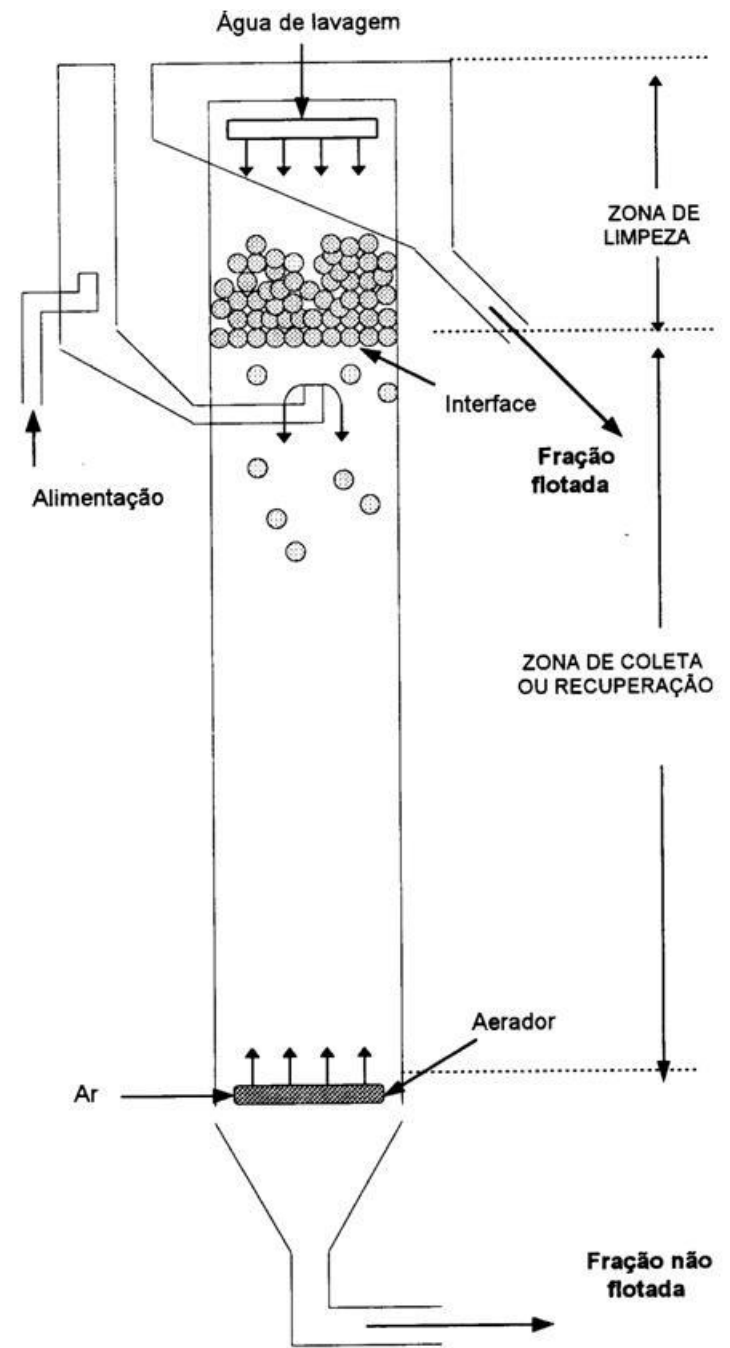
Mecânica



Coluna



usina de Tapira, MG



Coluna

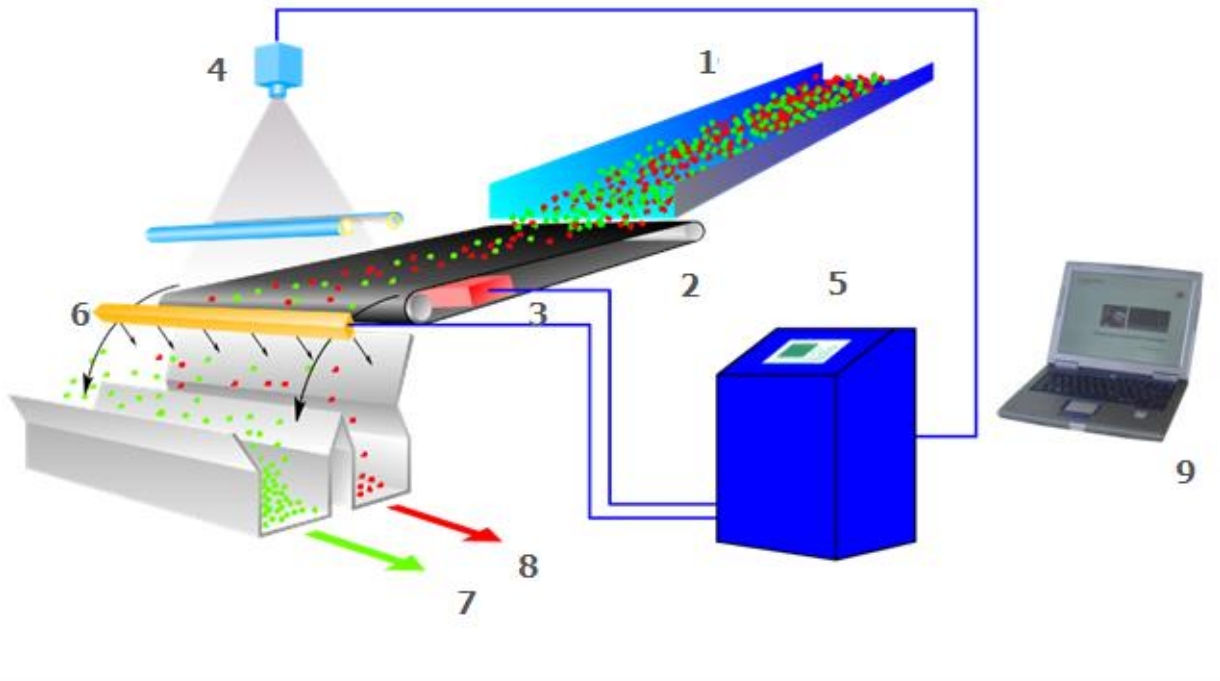


CATAÇÃO ("SORTING")

- compreende a separação de minerais através das diferenças entre suas propriedades (ópticas - *cor, brilho*; pureza; físicas - *mineral A é grosso, enquanto o B é fino*)
- pode ser efetuada manualmente, ou em equipamentos específicos

SORTING

Video



1. Material feed
2. Acceleration
3. Metal sensor or X-ray sensor
4. Line scan camera
5. Data processing
6. Air pressure valves
7. **Accept stream**
8. **Reject stream**
9. LAN interface to central control room

Deteciores:

- Cor
- Infravermelho próximo (NIR)
- Fluorescência de raios X
- Radiometria
- Transmissão de raios X
- Sensor Eletromagnético

DISSOLUÇÃO SELETIVA

- ❑ compreende a separação de minerais através das diferenças entre os seus comportamentos químicos na presença de determinados reagentes;
- ❑ promove-se a solubilização seletiva de uma ou mais espécies.

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MATÉRIAS PRIMAS MINERAIS

ESQUEMA USUAL

DE PREPARAÇÃO

DE AMOSTRA E

ENSAIOS DE

SEPARAÇÕES

MINERAIS

