

# Beneficiamento gravimétrico

## Caracterização



**Tecnologia  
em Mineração**

# Caracterização

## Característica x métodos

<b>Característica</b>	<b>Método indicado de medida</b>
Mineralogia	Microscopia óptica e eletrônica + difração de RX
Composição (minerais)	Análise química (lixiviado) + microsonda de RX
Quantificação dos minerais	Análise de imagens + análise química + tomografia RX
Distribuição tamanho	Análise de imagens
Textura	Análise de imagens (microscopia)
Distribuição de tamanhos	peneiramento + sedimentação + elutriação + difração RX
Formato	Análise de imagens + absorção gasosa
Densidades	Picnometria
Espectro de liberação	Análise de imagens de microscopia + tomografia RX
Distribuição densimétrica	Ensaio afunda-flutua

# Amostragem

## Definição

Operação de **remoção** de uma **parte** conveniente de um grande volume, garantindo que as características (composição, densidade) permaneçam as mesmas, tanto no todo quanto na parte removida.

Plano de amostragem

# Amostragem

## Tipos

### Amostragem primária

Lote da população original

### Amostragem secundária

Subamostras a partir da amostra primária,  
usando técnicas de divisão do lote original

Cuidar segregação

# Amostragem primária

## Tipos

### Diretamente da população alvo

- Porções, incrementos
- Aleatória (mesma probabilidade)
- Sistemática (intervalos regulares)
- Estratificada (divisão em grupos distinguíveis - proporcional às massas)

# Amostragem primária

## Dificuldades

### Materiais particulados

- Variações de tamanho, formato, massas e composições
- Problemas de degradação e/ou contaminação

### Pilhas

- Amostragem aleatória ou sistemática
- Tendência de segregação granulométrica em pilhas

# Amostragem secundária

## Técnicas

- Objetivo de dividir ou quartear a amostra primária em alíquotas de volume adequado
- Quarteadores, mesa divisória, pilhas cônicas e alongadas

# Caracterizações

Mineralógica, física e química

- Identificação mineralógica
- Análise modal
- Análise química quantitativa
- Densidade
- Tamanho de partículas
- Formato das partículas
- Outras características físicas



# Caracterizações

## Identificação mineralógica

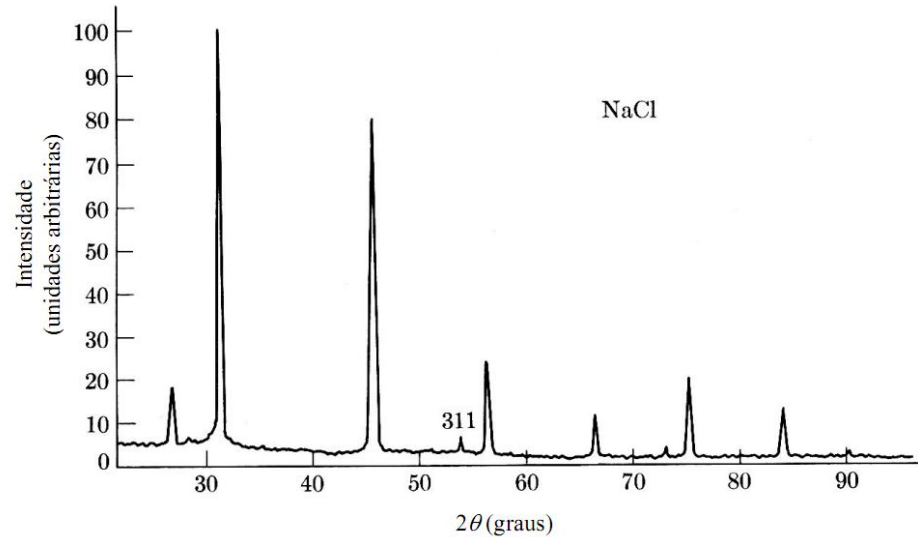
- Identidade dos minerais presentes
- Composição química das espécies
- Existência de elementos traços
- Associações entre minerais

### Instrumentos:

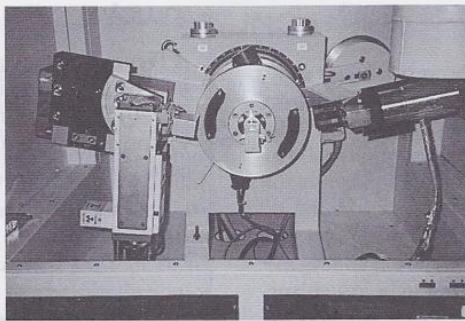
- Microscópio estereoscópio (estereomicroscópio)
- Microscópio ótico polarizante de luz transmitida
- Microscópio ótico polarizante de luz refletida
- Microscópio eletrônico de varredura
- Difratorômetro de raios-X

# Caracterizações

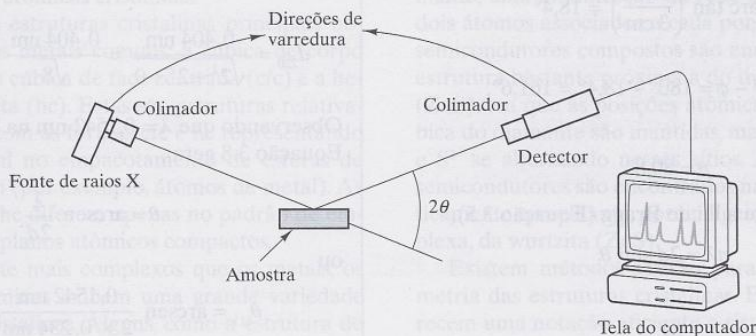
## Difratometria de raios-X



Padrão de difração do NaCl



(a)



(b)

- Uso de difratômetro;
- Sistema de varredura eletromecânico;
- Padrões de pó são utilizados para comparação (padrões conhecidos);
- Comparação realizada por computador (*buscar/combinar*).

# Caracterizações

## Difratometria de raios-X

- Ferramenta experimental padrão para analisar estruturas cristalinas;
- O arranjo atômico regular dos cristais serve como uma grade de difração subnanométrica para a radiação X (comprimento de onda subnanométrico);
- Materiais monocristalinos e policristalinos podem ser analisados desta maneira (ou em pó  $\sim 1\text{g}$ ) podem ser analisados desta maneira.

# Caracterizações

## Análise modal

Proporções do minério: análise quantitativa ou semiquantitativa

- análise química
- ATG e ATD
- difratometria de raios-X
- análise de imagens de microscopia ótica ou eletrônicas (seções polidas)

$$m_i = \frac{\rho_i V_i}{\sum_j \rho_j V_j}$$

Mineral	Fração em volume – $V_i$ (%)	Densidade relativa estimada - $\rho_i$	Fração em massa – $m_i$ (%)
Zircão	1,2	4,65	2,1
Ilmenita	3,0	4,75	5,1
Rutilo	2,0	4,20	3,0
Monazita	0,4	5,20	0,7
Quartzo	90,9	2,65	86,7
Outros	2,5	2,70	2,4

# Caracterizações

## Análise química quantitativa

### Técnicas analíticas

- métodos clássicos de gravimetria
- volumetria
- espectrofotometria de ultravioleta
- fluorescência de raios-X
- espectrofotometria de absorção atômica
- espectrometria de plasma (ICP)

### Para carvão mineral:

- teor de cinzas (calcinação)
- poder calorífico (bomba calorimétrica)
- enxofre total (orgânico, pirítico e calcítico)

# Caracterizações

## Densidade

### Aspectos gerais

- densidade absoluta, massa específica ou densidade
- $\rho$
- concentração de matéria em um corpo
- razão entre a massa e o volume da substância
- Quartzo: densidade  $2.650\text{kg/m}^3$  e densidade relativa de 2,65

# Caracterizações

## Densidade

### Aspectos gerais

- depende dos tipos de átomos do material e da maneira como estão estruturados;
- para sólidos, depende da composição química e estrutura atômica;
- sólidos amorfos geralmente são mais volumosos e apresentam maiores densidades que cristalinos;

<b>Fórmula química</b>	<b>Mineral</b>	<b>Estrutura cristalina</b>	<b>Densidade relativa</b>
C	Grafite	Hexagonal	2,23
	Diamante	Isométrica	3,51
CaCO <sub>3</sub>	Calcita	Hexagonal	2,71
	Aragonita	Ortorrômbica	2,94
FeS <sub>2</sub>	Pirita	Isométrica	5,02
	Marcassita	Ortorrômbica	4,89

# Caracterizações

## Densidade

### Medição

- princípio de Arquimedes

Picnômetro + balança

$$\rho_s = \frac{\textit{massa}}{\textit{volume}} = \rho_f \left[ \frac{m_1 - m_2}{m_3 + (m_1 - m_2) - m_4} \right]$$

$m_2$  = peso frasco seco vazio + tampa

$m_1$  = peso frasco seco vazio + tampa + material

$m_4$  = peso frasco seco vazio + tampa + material + água

$m_3$  = peso frasco seco vazio + tampa + água

$\rho_f$  = densidade da água



# Caracterizações

## Tamanho das partículas

Método	Intervalo de tamanhos aplicável ( $\mu\text{m}$ )
Peneiramento	100 000 – 10
Elutriação centrífuga	40 – 5
Microscopia ótica	50 – 0,025
Microscopia eletrônica	1 – 0,005
Sedimentação gravitacional	40 – 1
Sedimentação centrífuga	5 – 0,05
Difração laser	2000 – 0,1

# Caracterizações

## Cyclosiser



# Caracterizações

## Formato das partículas

Tamanho volumétrico da partícula ou  
Diâmetro da esfera equivalente:  $d_v$

Tamanho superficial:  $d_s$

Volume da partícula:  $V_p$   
picnometria

Área superficial:  $A_p$   
Permeametria ou adsorção  
gasosa

$$d_v = \left( \frac{6V_p}{\pi} \right)^{1/3}$$

$$d_s = \left( \frac{A_p}{\pi} \right)^{1/2}$$

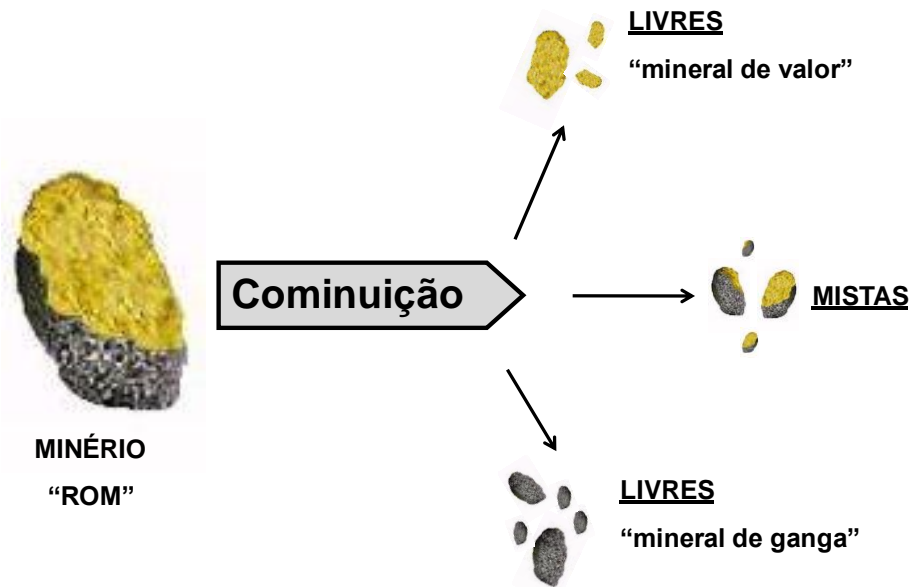
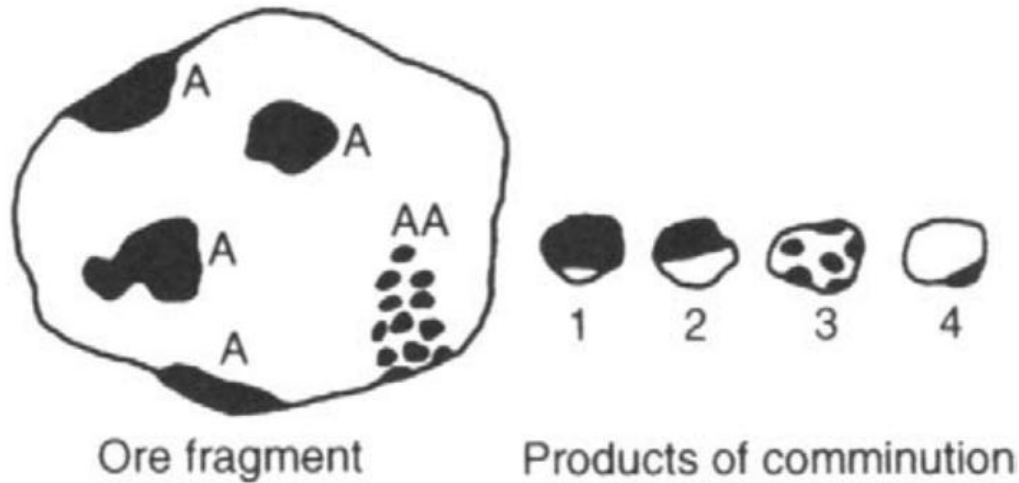
# Caracterizações

## Classificação de tamanhos de partículas

Designação qualitativa	Tamanho de partícula
Colóides	$< 1 \mu\text{m}$
Ultrafinos	$< 10 \mu\text{m}$
Muito finos	$< 20 \mu\text{m}$
Finos	$< 100 \mu\text{m}$
Intermediários	$< 500 \mu\text{m}$
Grossos	$< 2 \text{ mm}$
Muito grossos	$> 2 \text{ mm}$

# Caracterização

## Dilema da liberação



Cominuição:  
britagem e  
moagem

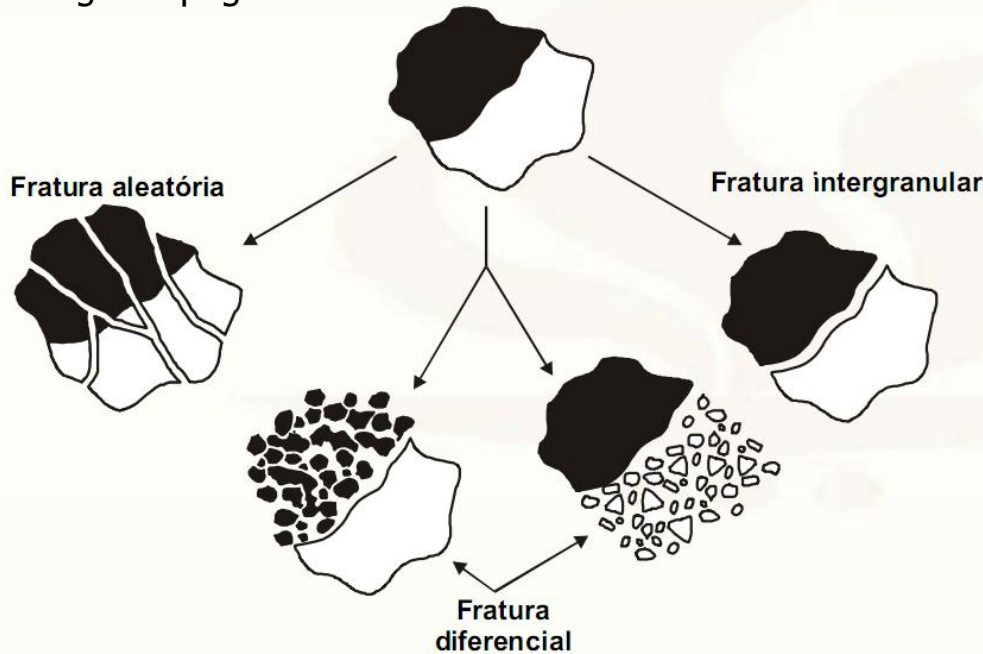
# Caracterização

## Modos de fratura

A fratura depende das:

- características do material e;
- do processo de cominuição.

**Previsão:** medida da área interfacial por unidade de volume; em fraturas transgranulares, a área interfacial permanece constante após cominuição



### Fratura ideal: intergranular

Exemplos de minérios: carvões e alguns minérios de ferro

Processos que favorecem: moagem autógena e prensa de rolos.

### Fratura diferencial

Exemplos de minérios: zinco e chumbo

Grandes diferenças de tenacidade

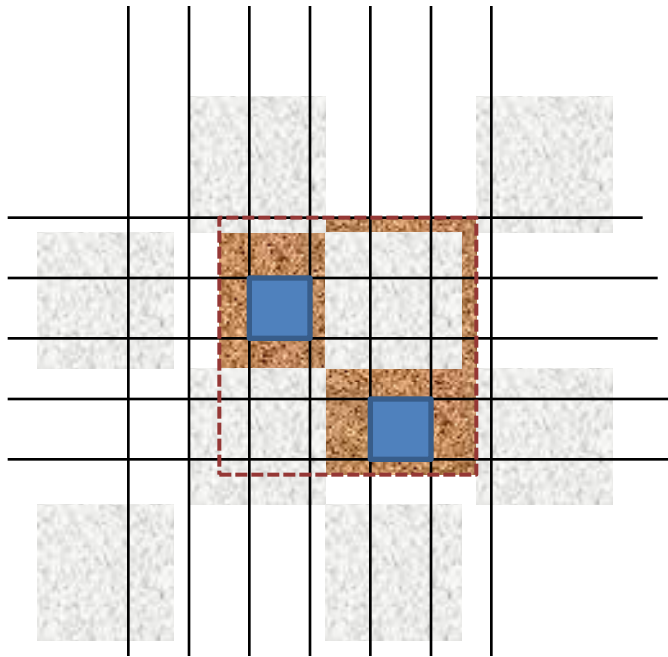
### Fratura transgranular

Mais comum

Moagem intensa

# Cominuição

## Grau de liberação



Superposição de uma grade regular de fraturas com a fratura do grão:

Notar que o quadrado de maior tamanho (marrom) mostra que apenas 2 em 16 partes encontram-se liberadas, ou seja, 12,5%.

# Caracterização

## Espectro de liberação

Espectro de liberação  
(medida da  
distribuição completa  
das partículas)



Análise de  
imagens de  
microscopia

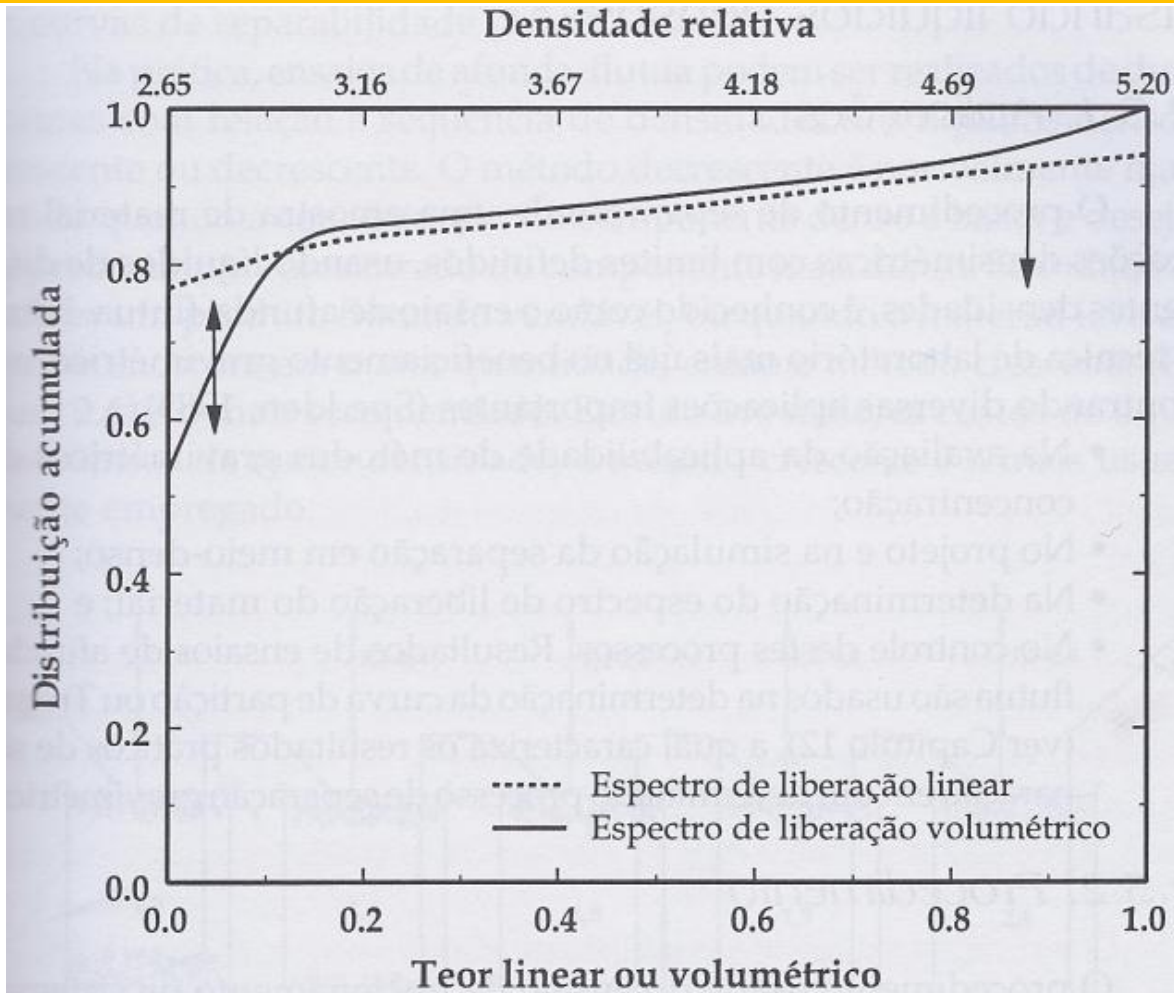


Figura 2.5. Comparação entre o espectro de liberação aparente (linear) e o real (volumétrico), para partículas de  $0,5 \times 0,425$  mm de um minério binário (pirita/quartzo) (modificado de King e outros, 1993).



# Caracterização

## Fracionamento densimétrico

Conhecida por “**ensaio de afunda-flutua**”

Aplicações:

- Avaliação da aplicabilidade de métodos gravimétricos;
- Projeto e simulação da separação em meio-denso;
- Determinação do espectro de liberação do material;
- Controle dos processos. Resultados úteis para a determinação da curva de partição (Tromp)

# Caracterização

## Funil de separação

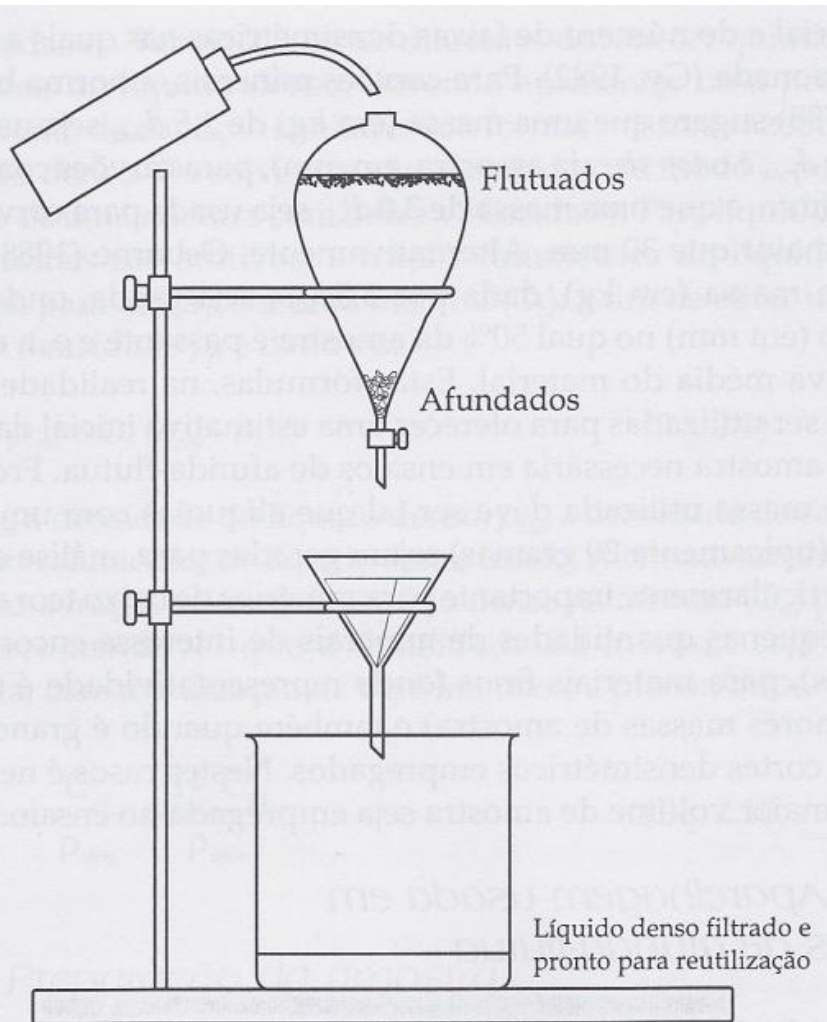


Figura 2.8. Fracionamento densimétrico de partículas usando um funil de separação.

Utilizado para partículas de tamanhos intermediários: décimo de milímetro a alguns milímetros.

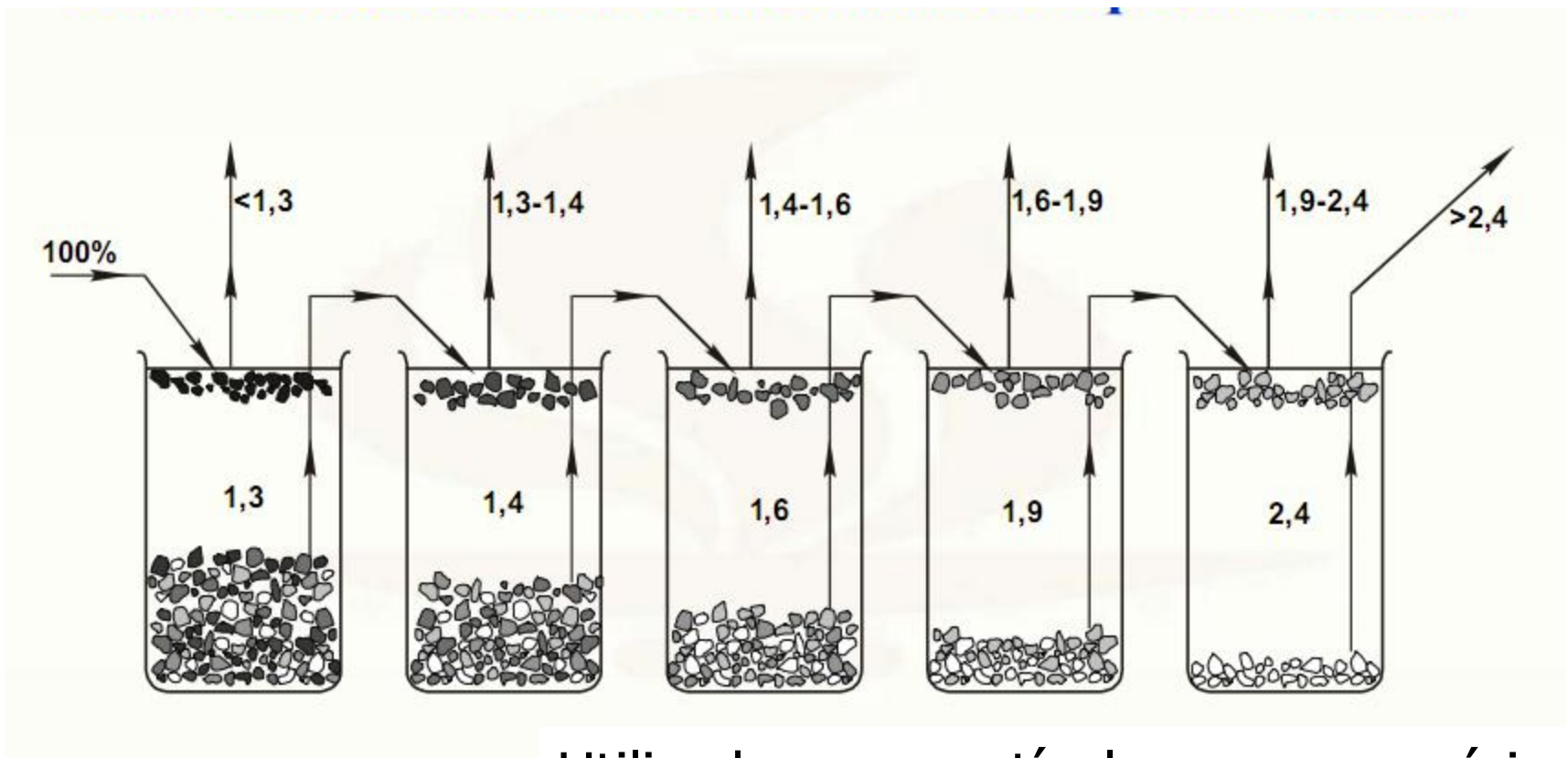
Após separação, a fração afundada é filtrada. O líquido denso é reaproveitado de imediato.

Importante que haja tempo para a separação efetiva: a velocidade de sedimentação de partículas depende da granulometria, da diferença de densidade entre a partícula e o líquido e da viscosidade do líquido.

# Caracterização

## Separação densimétrica com líquidos densos

### Procedimento seqüencial de análise densimétrica

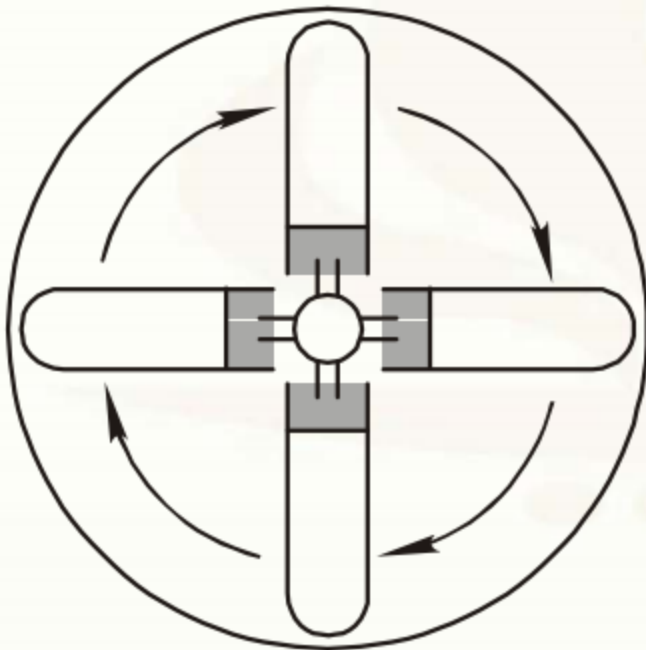


Utilizado para partículas grossas: vários milímetros a decímetros

# Caracterização

## Separação densimétrica em centrífugas

Fracionamento densimétrico de partículas ultrafinas em centrífugas de laboratório (ex.: uso carvão  $< 10\mu\text{m}$ )



# Caracterização

## Soluções

Principais materiais utilizados na confecção de líquidos densos:

- líquidos orgânicos;
  - soluções aquosas;
- } Homogêneos ( + usados em labo)
- 
- suspensões aquosas de sólidos de altas densidades (quartzo, barita, magnetita)
- } Usados pela indústria: base da concentração em meios densos

# Caracterização

## Soluções aquosas

Nome	Fórmula química	Densidade relativa
Cloreto de sódio	NaCl	1,2
Cloreto de zinco	ZnCl <sub>2</sub>	1,75
Cloreto de césio	CsCl	1,8
Brometo de zinco	ZnBr <sub>2</sub>	2,3
Politungstato de sódio	-	2,9

# Caracterização

## Líquidos orgânicos

Nome	Fórmula química	Densidade relativa	Sinônimos	Solvente
Tricloroetileno	$\text{CHCl.CCl}_2$	1,46		Álcool etílico
Tetraclorometano	$\text{CCl}_4$	1,59	Tetracloreto de carbono	Benzeno
Tetracloroetileno	$\text{CCl}_2\text{CCl}_2$	1,62	Percloroetileno	
Triclorobromometano	$\text{CCl}_3\text{Br}$	2,00		
Tribromometano	$\text{CHBr}_3$	2,89	Bromofórmio	Tetracloreto de carbono, álcool

# Caracterização

## Métodos X Granulometria

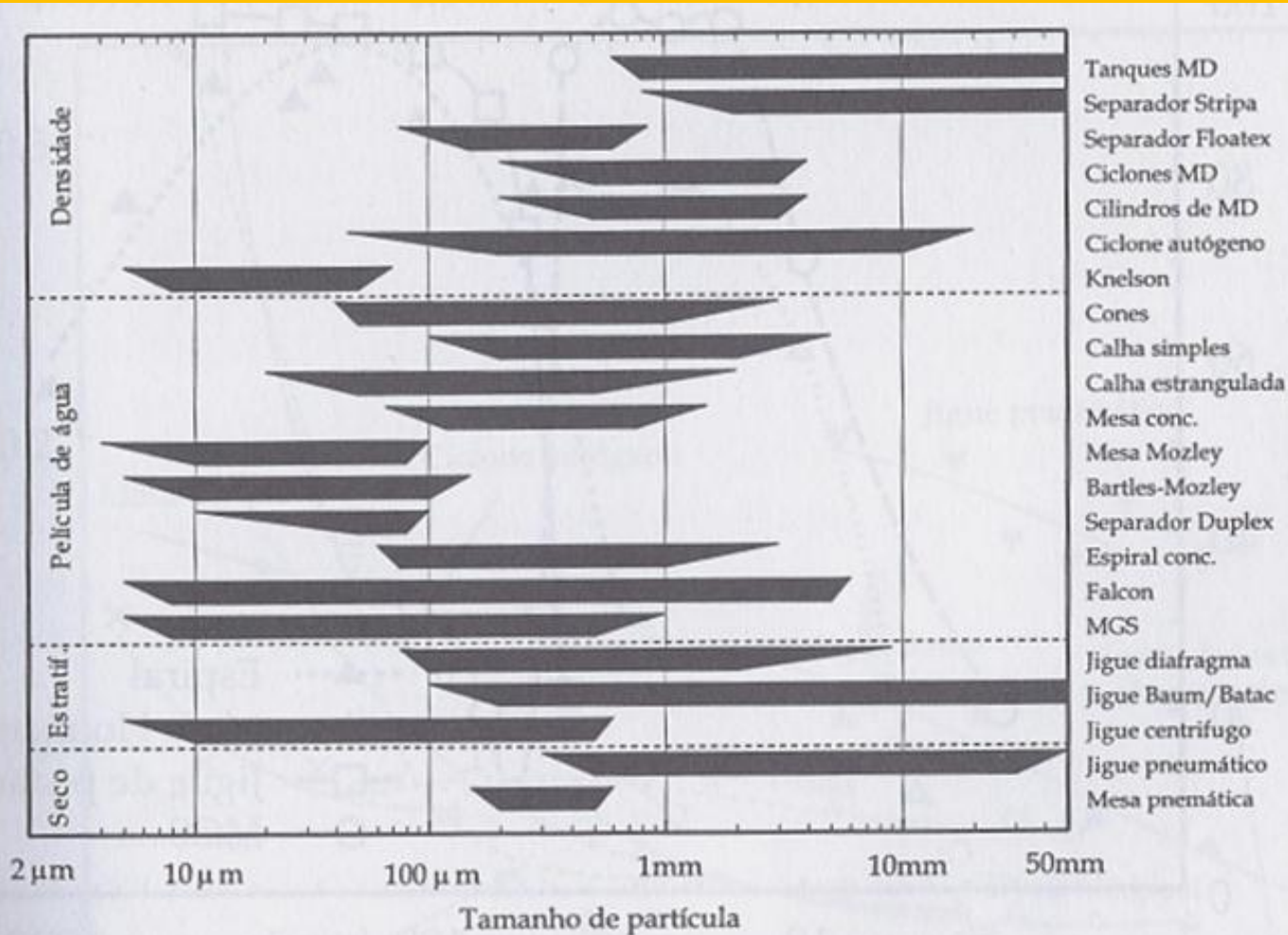


Figura 3.3. Aplicabilidade de diferentes métodos de concentração gravimétrica em função da granulometria.



# Caracterização

## Tamanho X precisão

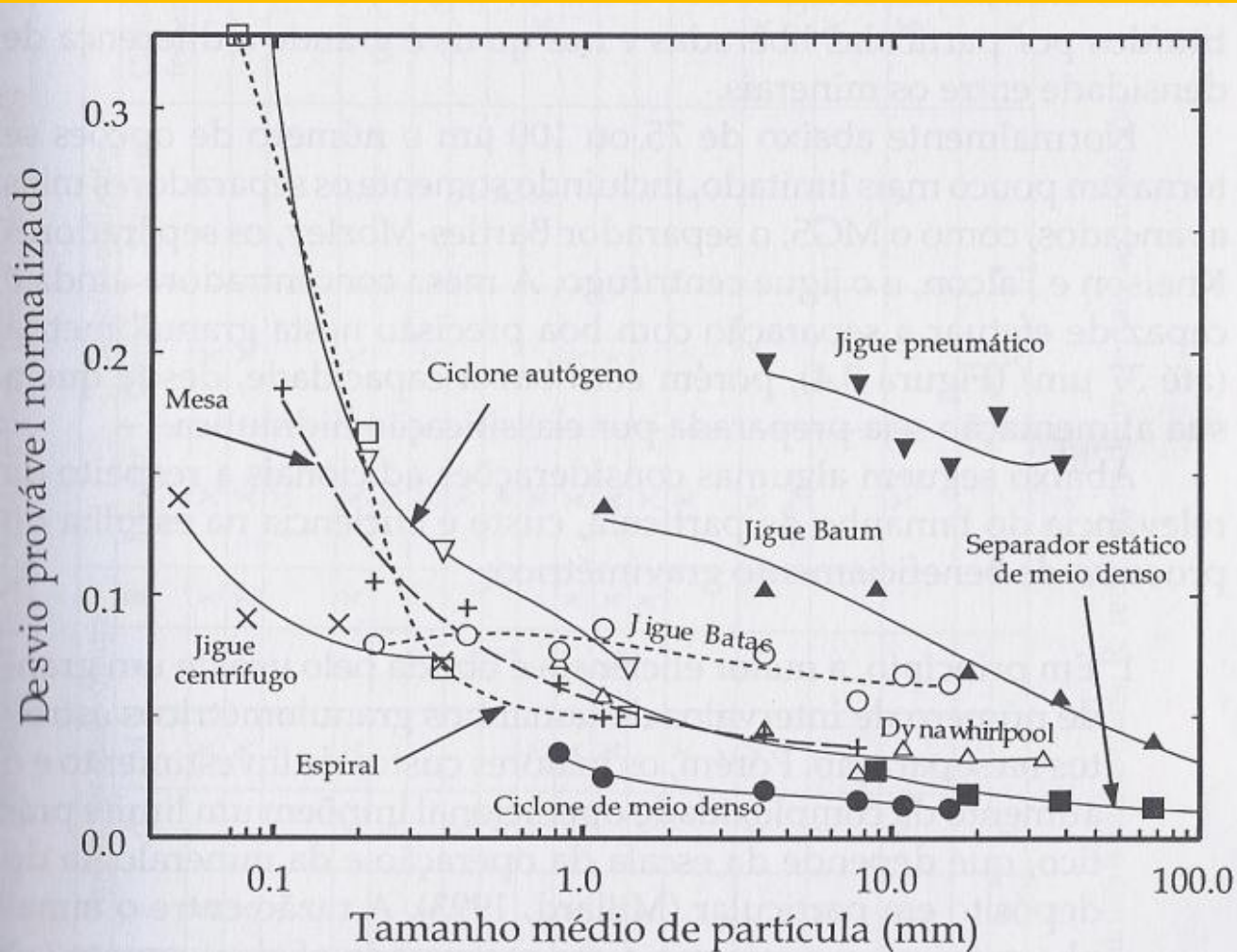
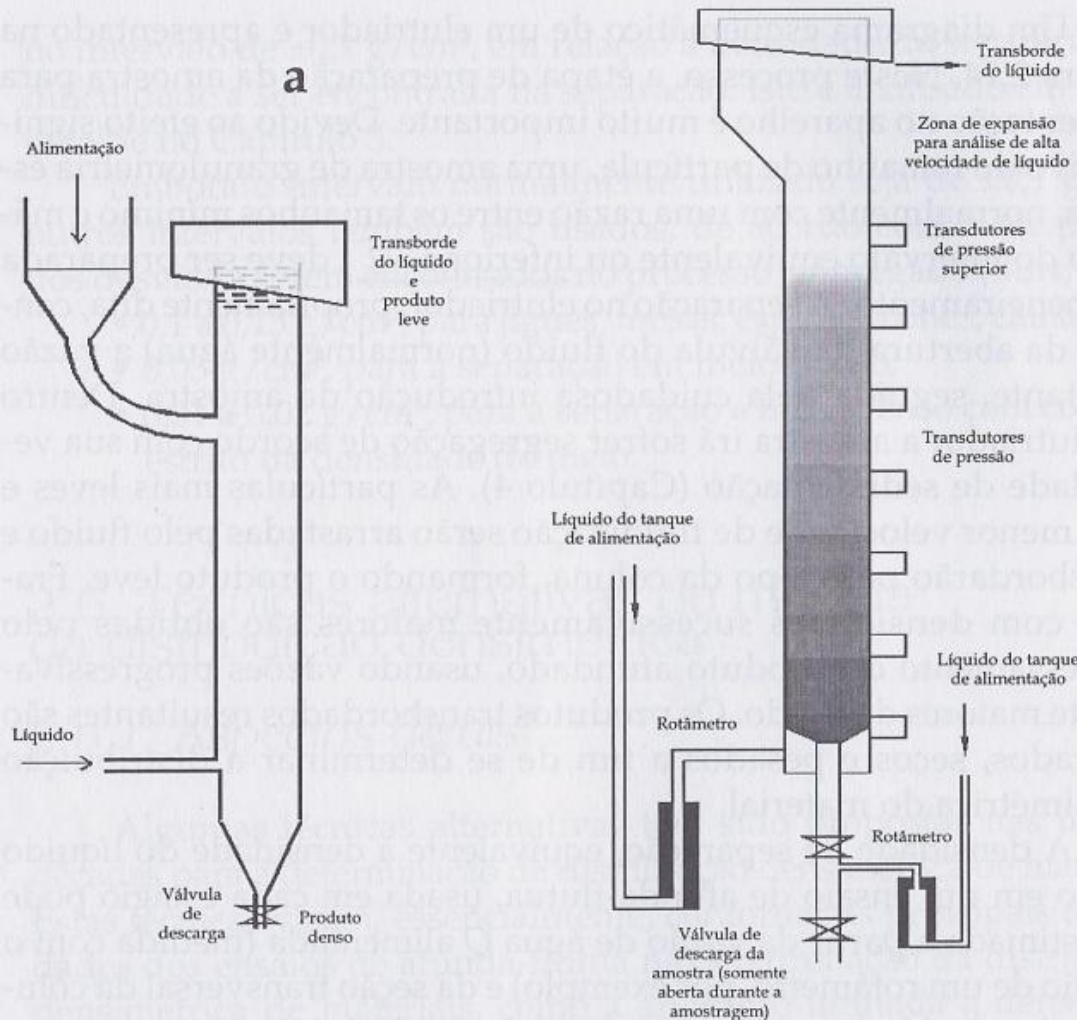


Figura 3.5. Efeito do tamanho de partícula na precisão de separação no beneficiamento de carvão. Dados de fontes diversas

# Caracterização

## Técnicas alternativas - elutriação



b

- Alternativa aos ensaios de afunda-flutua;
- Equipamento simples e de fácil operação;
- Separação baseada na velocidade de fluidização de partículas.

$$u = \frac{Q}{A}$$

$$\rho_s = \rho_f + \left[ 1 + \frac{3u^2 C_D}{4gd_p} \right]$$

$u$  = velocidade média do fluido

$\rho_s$  = densidade de separação

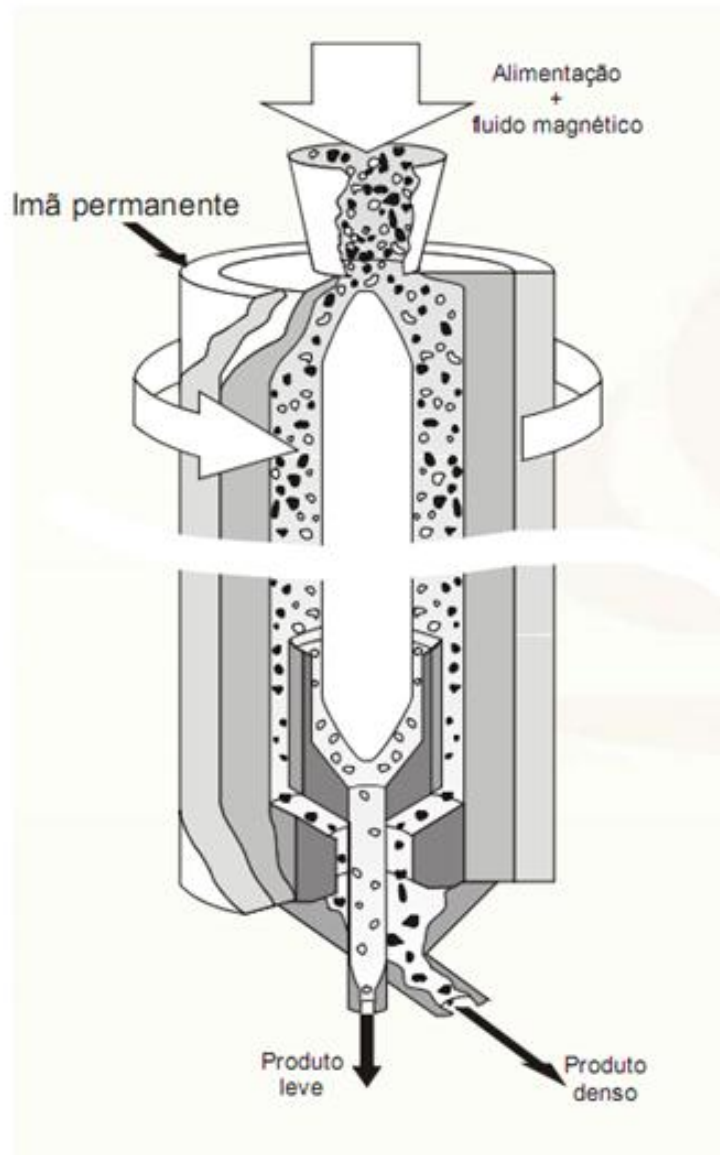
$d_p$  = tamanho equivalente de partícula

$C_D$  = coeficiente de arraste

Figura 2.14. Diagrama esquemático de um elutriador convencional (a) e do elutriador usado por Galvin e Pratten (1999) (b).

# Caracterização

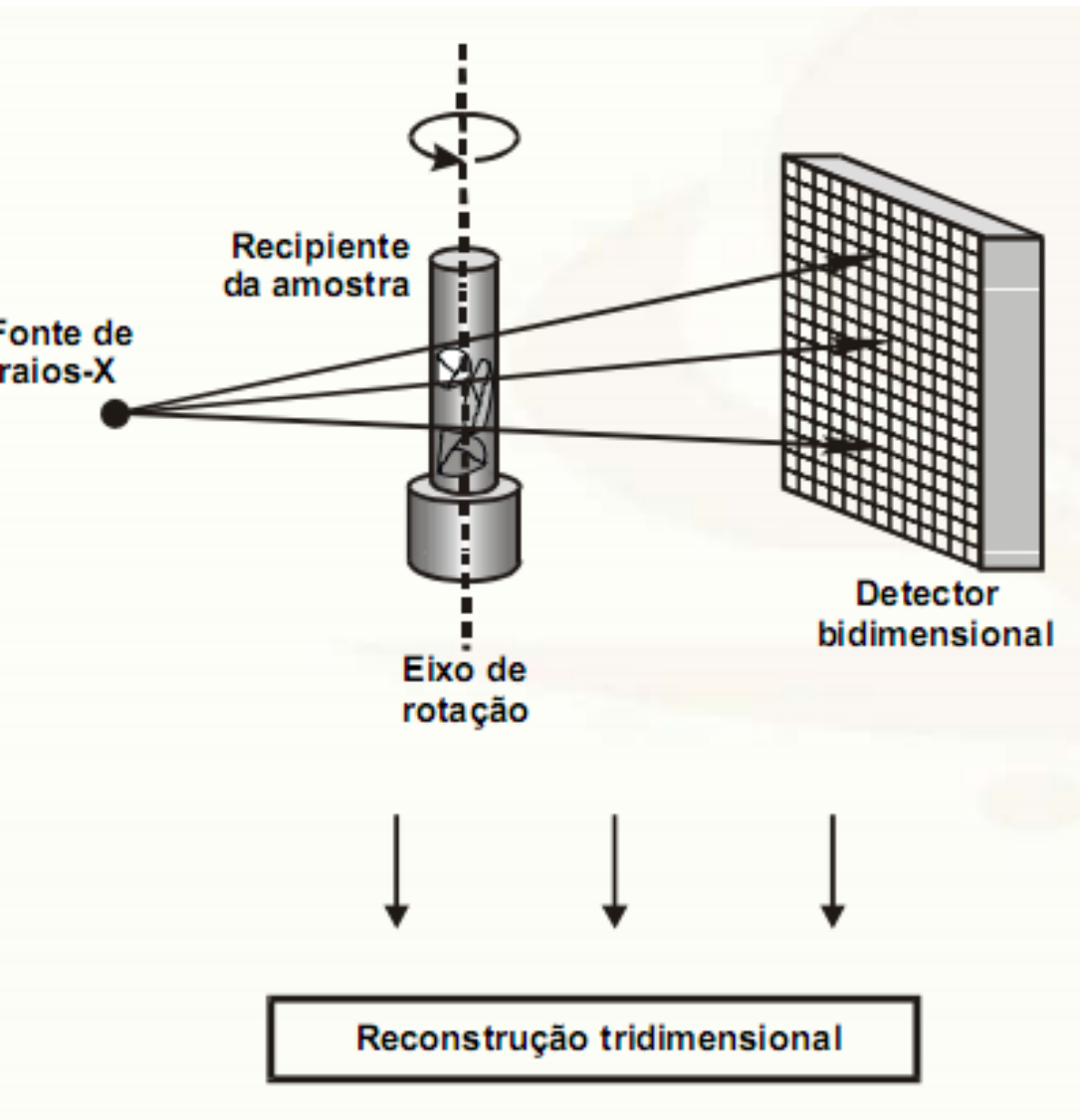
## Técnicas alternativas - Magstream



- Separação magneto-gravimétrica explora o aumento da densidade aparente de fluídos paramagnéticos ou ferromagnéticos quando submetidos a um campo magnético não uniforme;
- densidade do meio controlada pelo campo magnético.

# Caracterização

## Tomografia Raios-x



- Obtenção de imagens de seções de um objeto a partir de dados de reflexão ou transmissão;
- Grande resolução e capacidade de penetração;
- Fornece mapeamento da distribuição de densidades em uma seção do objeto.

# Caracterização

## Exercícios

### Exercícios de fixação II