

PMI3101 - INTRODUÇÃO À ENGENHARIA APLICADA À INDÚSTRIA MINERAL

Operações unitárias - concentração

São Paulo – 7 de maio de 2020

Professor Mauricio Guimarães Bergerman

Relembrando...

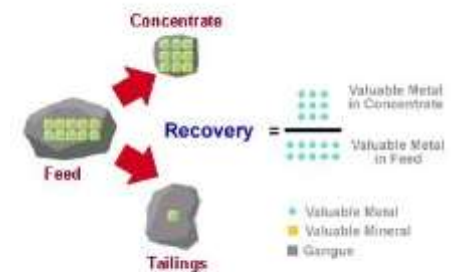
2

- Recuperação do mineral de interesse:

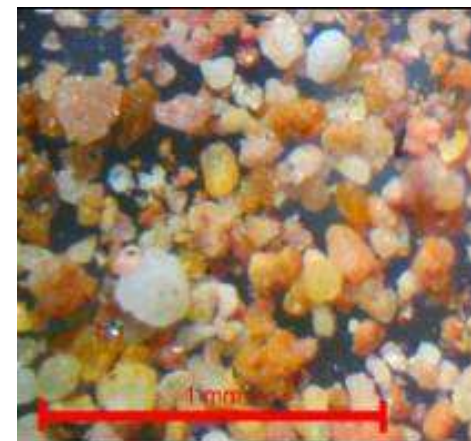
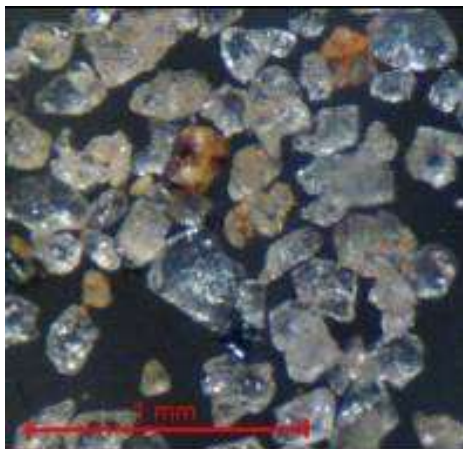


flotado (silica)

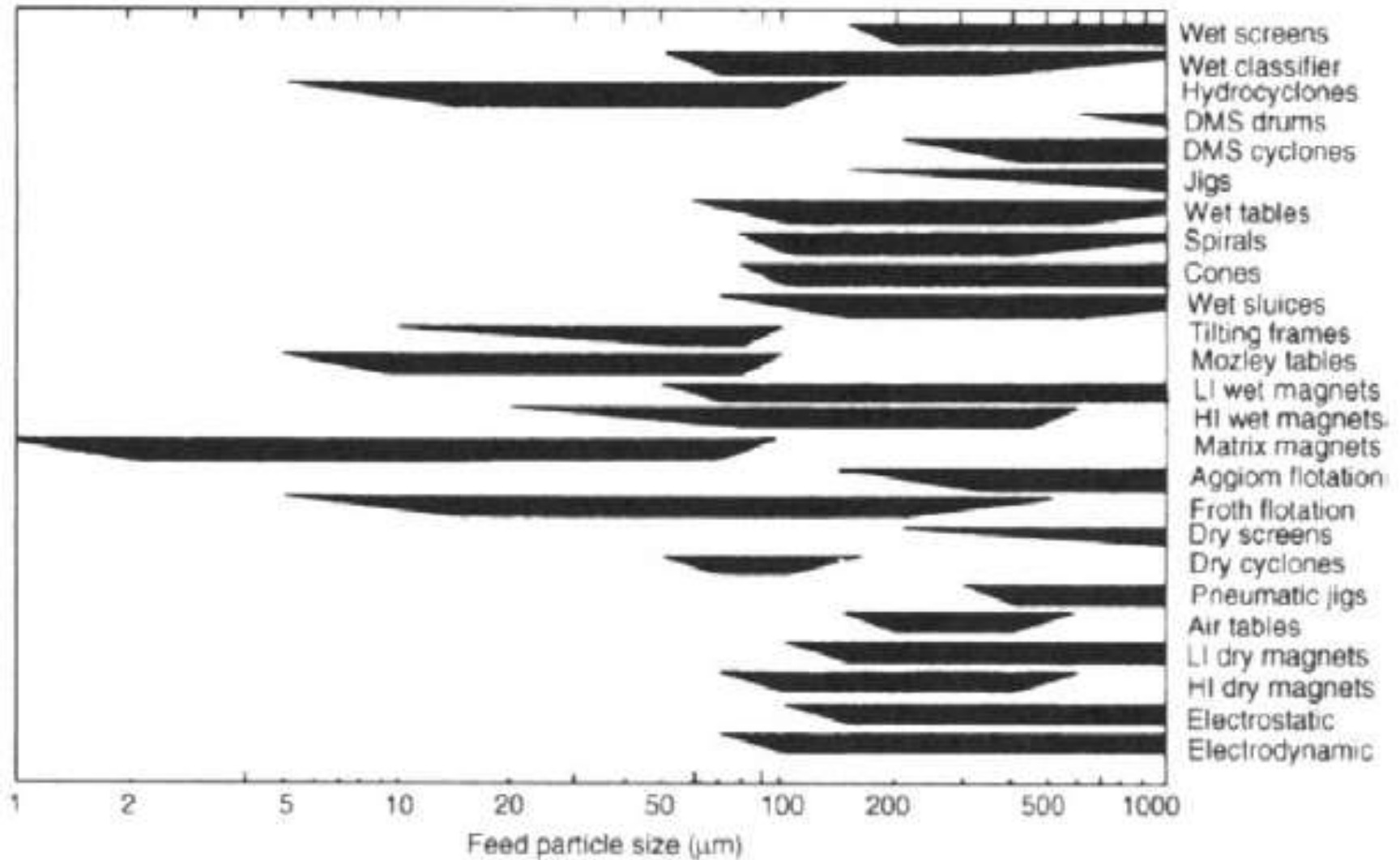
deprimido (bauxita)



Fonte: University (2005)



Concentração

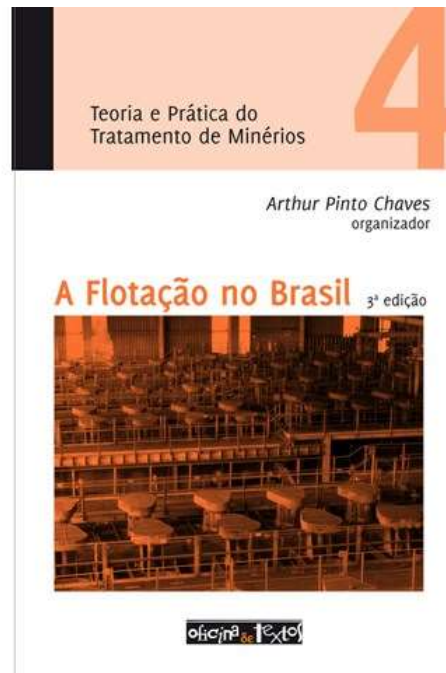


Cominuição e classificação

- Vídeo Mirabela

Concentração por flotação

- Capítulo 1 do livro:
- Teoria e prática do Tratamento de Minérios: A flotação no Brasil. Volume 4. 2013. 4 edição. Autores: Arthur Pinto Chaves



CONCENTRAÇÃO: Flotação

- Propriedades físico-químicas da superfície;
- 0,01 a 0,3 mm.



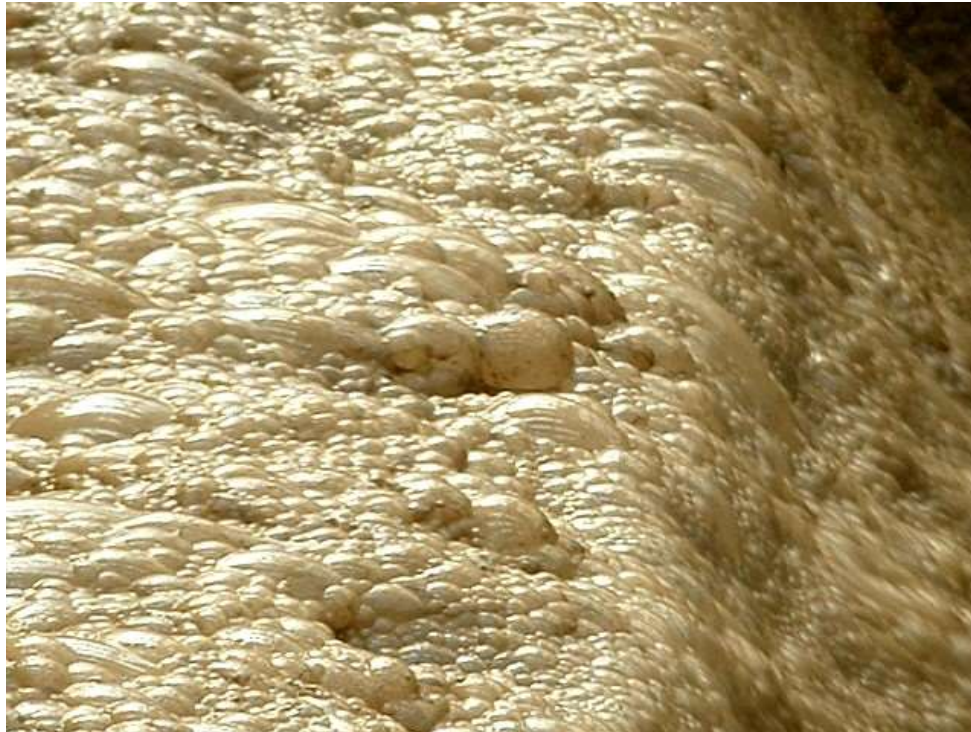
FLOTAÇÃO - CONCEITOS

- Alguns minerais, como grafite, carvão, talco e enxofre são naturalmente repelentes a água. Os demais, via de regra, molham-se:



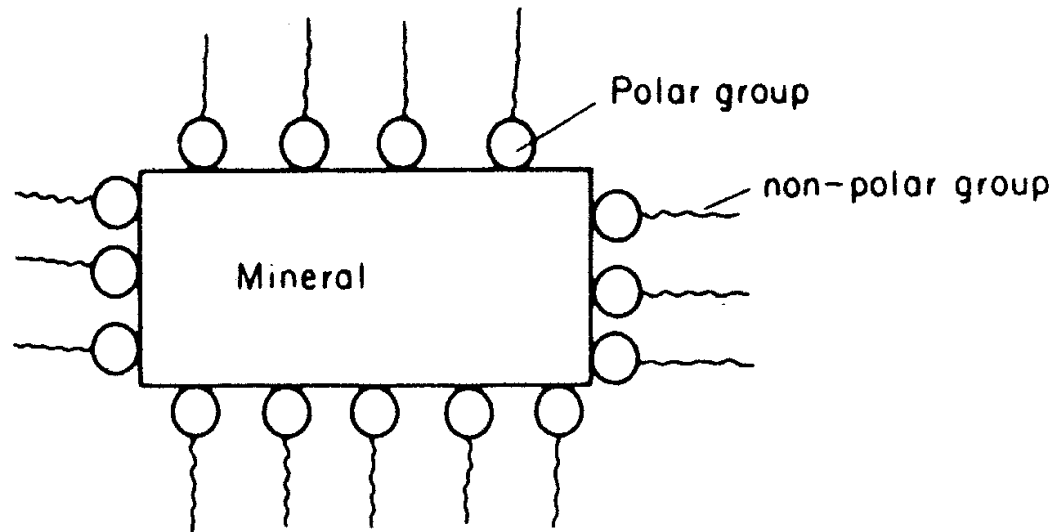
FLOTAÇÃO - CONCEITOS

- A repelência a água (hidrofobicidade) pode ser usada para separar espécies minerais desde que se forneça ao sistema uma espuma estável onde as espécies hidrofóbicas sejam retidas.



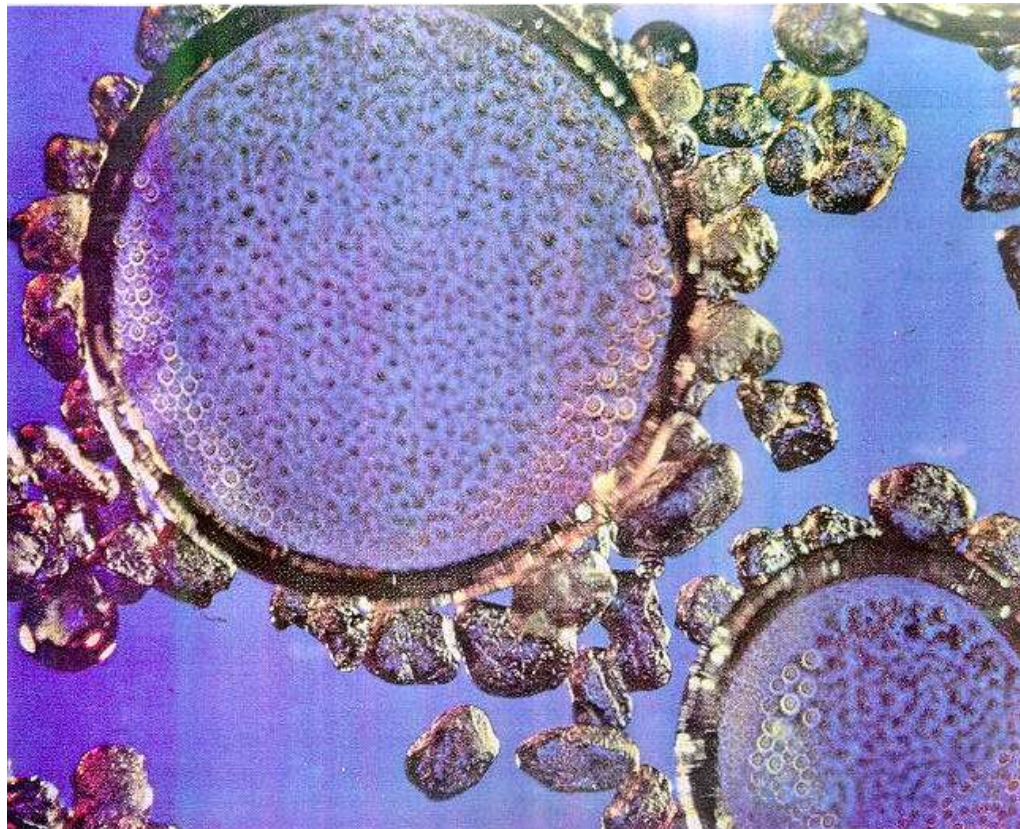
FLOTAÇÃO - CONCEITOS

- A hidrofobicidade pode ser induzida nas espécies minerais não hidrofóbicas mediante a adição criteriosa de produtos químicos:
- ▣ As espécies químicas adsorvem na superfície das partículas minerais e as tornam repelentes a água.



FLOTAÇÃO - CONCEITOS

- Fornecendo-se ar ao sistema, as partículas hidrofobizadas aderem as bolhas de ar e separam-se na espuma:



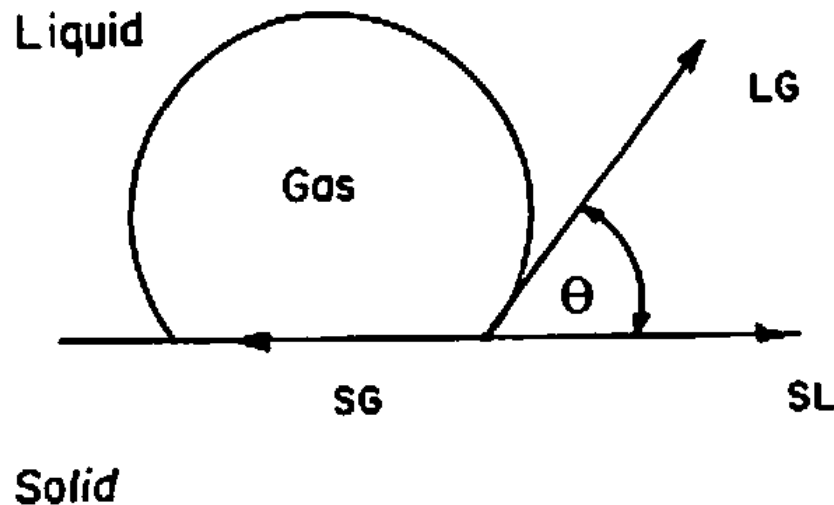
FLOTAÇÃO - CONCEITOS

□ Liberação:



FLOTAÇÃO - PRINCÍPIOS FÍSICO-QUÍMICOS

- Ângulo de contato: medida do ângulo interfacial sólido/líquido/gás. Ângulos da ordem de 60° são suficientes para que uma partícula seja considerada hidrofóbica. Materiais de altíssima hidrofobicidade tem Θ da ordem de 120° .



FLOTAÇÃO - PRINCÍPIOS FÍSICO-QUÍMICOS

- Tensão superficial: Na Física, a tensão superficial é um efeito que ocorre na camada superficial de um líquido que leva a sua superfície a se comportar como uma membrana elástica.
 - A presença de sais e bases elevam a tensão superficial da solução;
 - A presença de surfatantes reduzem a tensão superficial da solução.

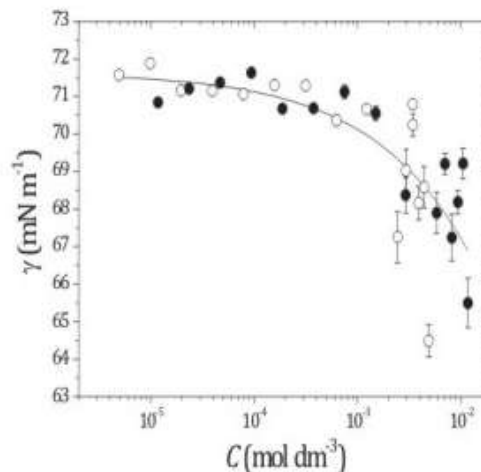


Figura 1: Tensão Superficial, γ , como função da concentração de segmentos de ácido acrílico. A linha contínua consiste no melhor ajuste da Equação (6) aos dados obtidos.

FLOTAÇÃO - PRINCÍPIOS FÍSICO-QUÍMICOS

- Potencial zeta:
 - ▣ Potencial medido no plano de cisalhamento entre a partícula e a solução, quando os dois estão em movimento relativo na presença de um campo elétrico;
 - ▣ Varia conforme a composição da solução.

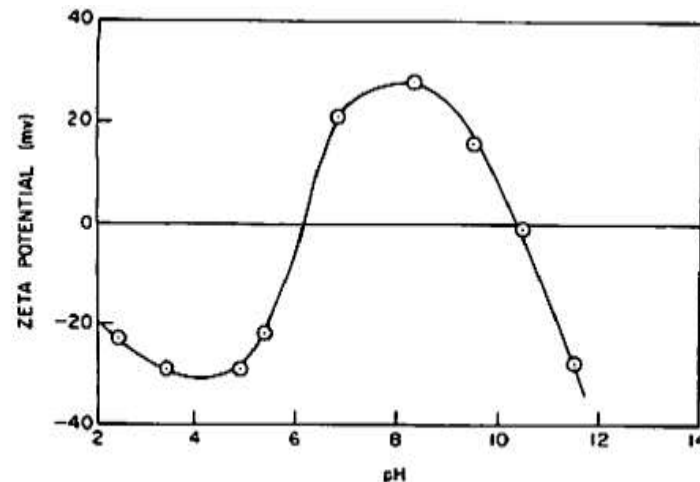


FIG. 61. Zeta potential of quartz as a function of pH in the presence of 1×10^{-4} M $PbCl_2$.¹²⁷

FLOTAÇÃO - PRINCÍPIOS FÍSICO-QUÍMICOS

- Adsorção: é a adesão de moléculas de um fluido a uma superfície sólida.
 - ▣ Física: interações envolvendo ligações de van der Waals e forças coulombicas entre o adsorvato (aquele que adsorve) e o adsorvente (aquele sobre o qual ocorre a adsorção);
 - ▣ Química: interações envolvendo ligações do tipo iônica, covalente e ponte de hidrogênio.

FLOTAÇÃO - FATORES CONDICIONANTES

- Para que ocorra a flotação, é preciso que se atenda a três critérios:
 - ▣ Termodinâmico: Partícula que se deseja coletar tem que ser hidrofóbica (ângulo de contato, reagente, pH e temperatura);

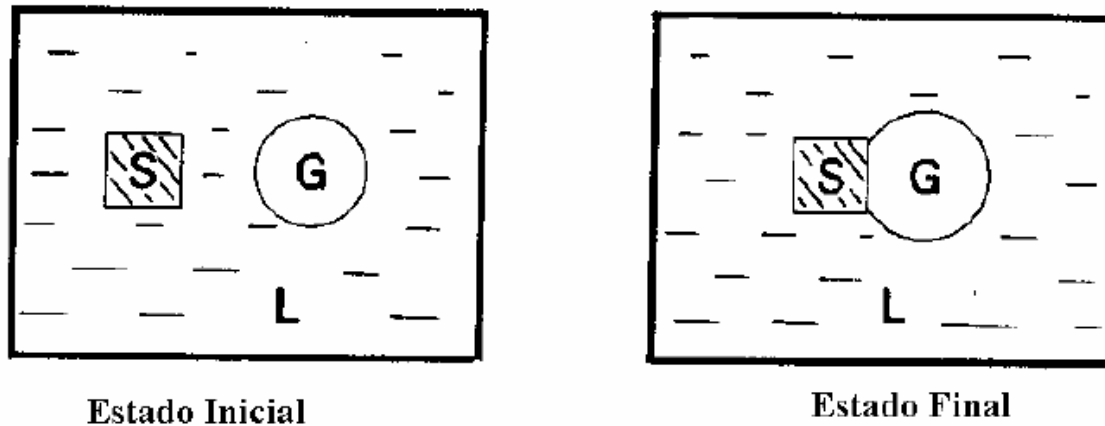
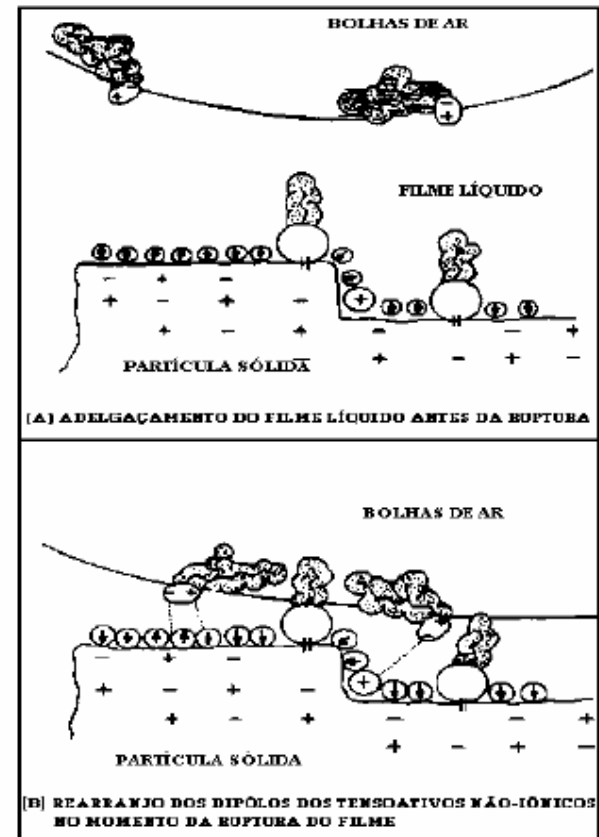


Figura 2.1. Ilustração do fenômeno de adesão partícula/bolha (S representa uma partícula mineral, G representa uma bolha de gás, imersas em meio aquoso L).

FLOTAÇÃO - FATORES CONDICIONANTES

- Para que ocorra a flotação, é preciso que se atenda a três critérios:
 - Cinético: Adesão partícula / bolha: rompimento da barreira energética que permite a adesão (temperatura, tamanho e hidrofobicidade, presença de espumantes e força iônica);

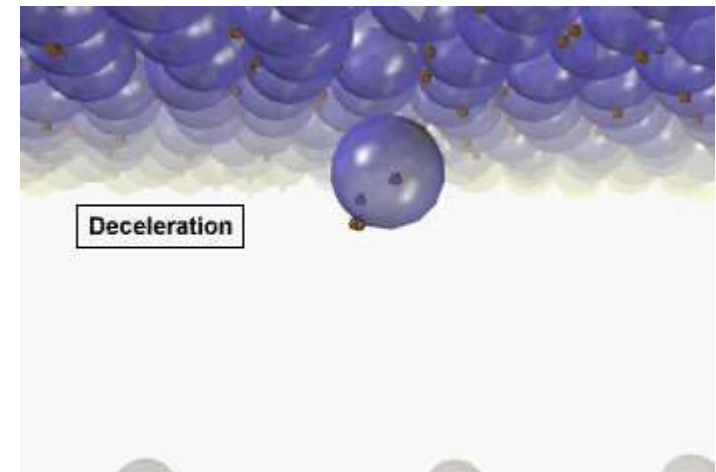
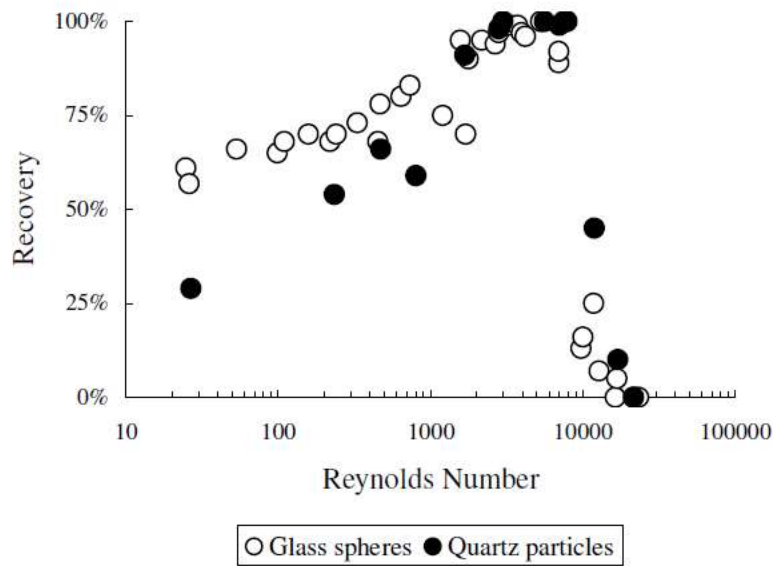


LEGENDA :

- TENSOATIVO NÃO-ÍONICO
- COLETOR
- MOLÉCULAS DE ÁGUA
- CONTRA-ÍONS

FLOTAÇÃO - FATORES CONDICIONANTES

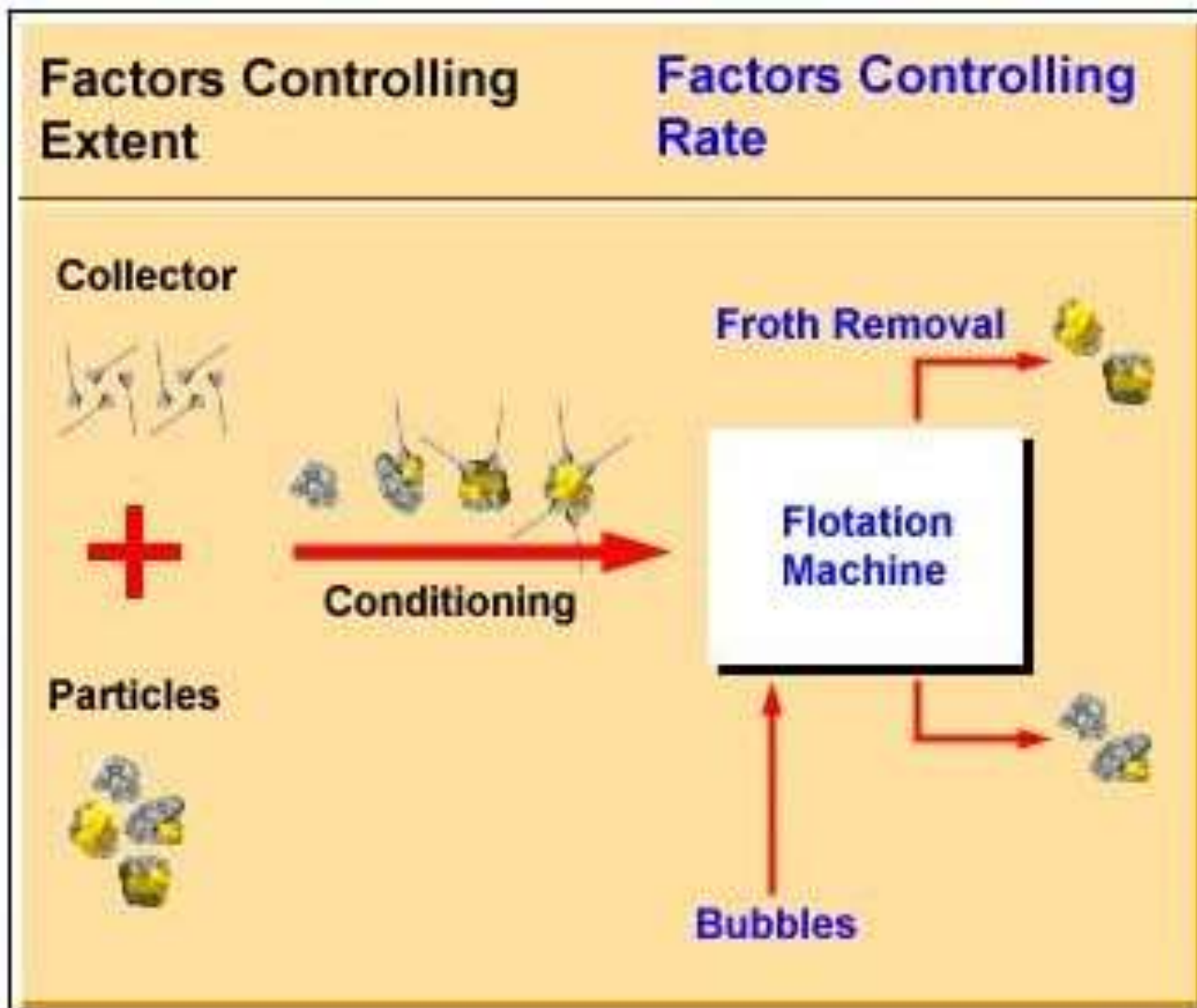
- Para que ocorra a flotação, é preciso que se atenda a três critérios:
 - ▣ Hidrodinâmico: Garantir a formação e o transporte do agregado partícula/bolha (agitação e tensão superficial adequadas);



Fonte: University (2005)

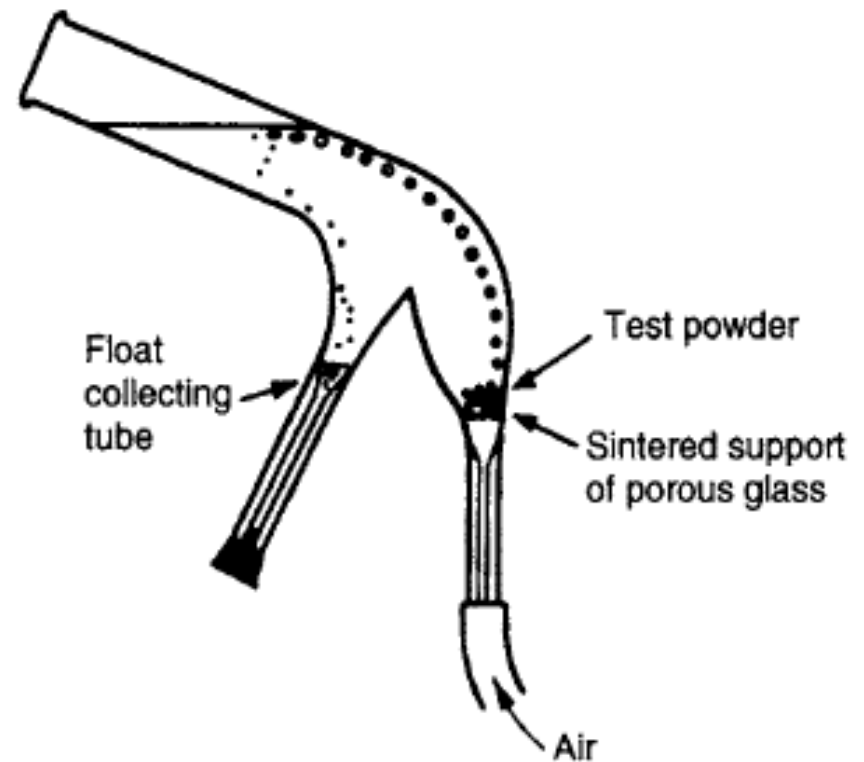
Figura 2.14. Influência do número de Reynolds na recuperação da flotação de partículas de quartzo e esferas de vidro (coletor=éter amina, 75 mg dm^{-3} , $\text{pH}=10$).
Fonte: Filho (2005)

FLOTAÇÃO - FATORES CONDICIONANTES



MÁQUINAS DE FLOTAÇÃO

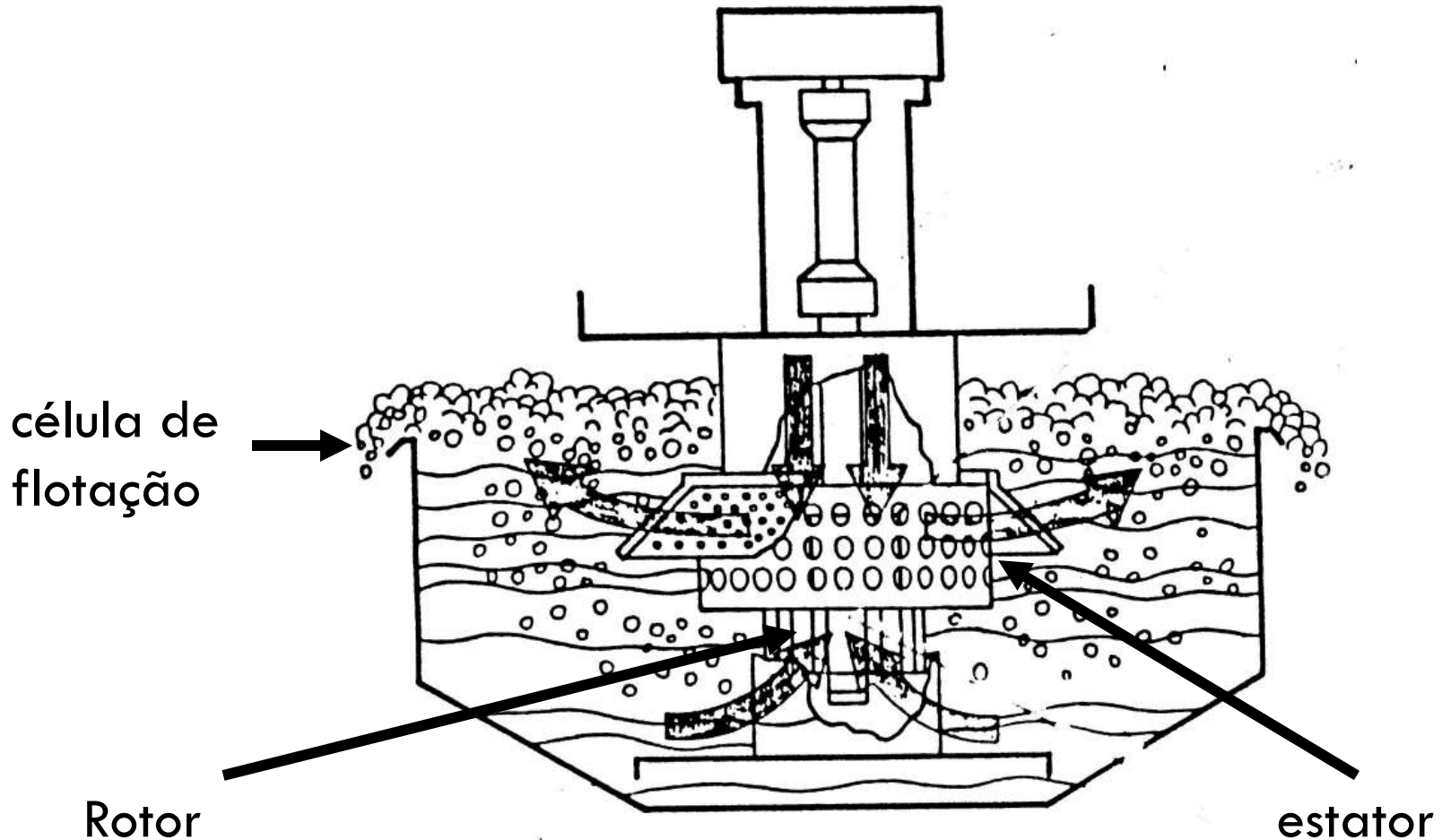
□ Outros equipamentos: células de laboratório



Fonte: Wills (2006)

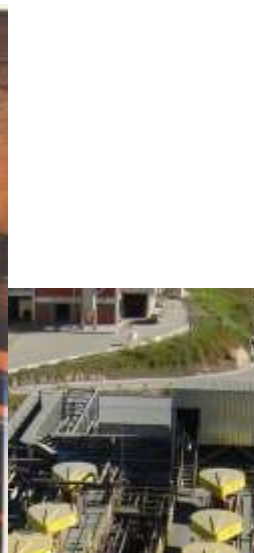
MÁQUINAS DE FLOTAÇÃO

□ Célula convencional:



MÁQUINAS DE FLOTAÇÃO

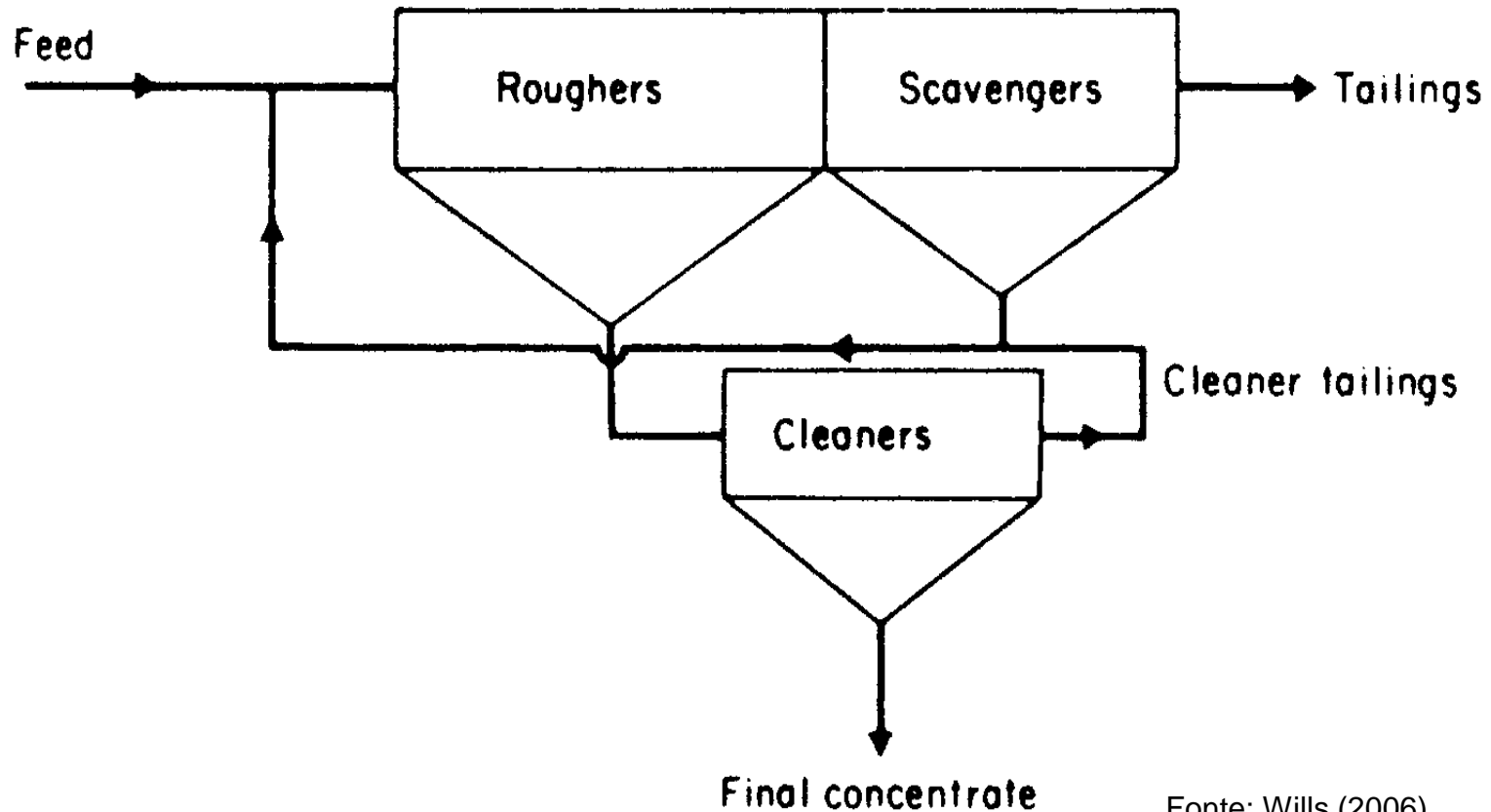
- Circuitos industriais de células convencionais:



TIPOS DE CIRCUITOS

23

- Circuitos industriais de flotação:



Fonte: Wills (2006)

Métodos gravíticos de concentração

- Capítulo 1 do livro:
- Teoria e prática do Tratamento de Minérios: Britagem, peneiramento e moagem. Volume 6. 2013. 1 edição. Autores: Arthur Pinto Chaves e Rotênio Castelo Chaves Filho



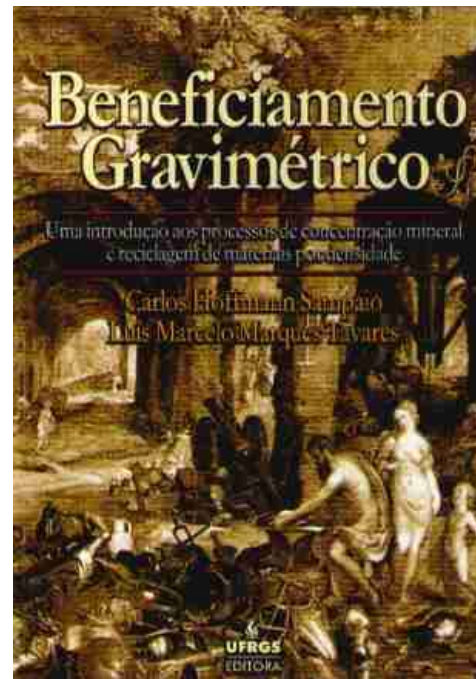
Métodos gravíticos de concentração

- Capítulo 7 do livro:
- Tratamento de Minérios. 2010. 5 edição. Autores: Adão Benvindo da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina A. França
- <http://www.cetem.gov.br/biblioteca/publicacoes/livros>



Métodos gravíticos de concentração

- Beneficiamento gravimétrico. 2005. 1 edição.
Autores: Carlos Hoffmann Sampaio e Luís Marcelo Marques Tavares



CONCENTRAÇÃO: Mét. densitários



CONCENTRAÇÃO: Mét. densitários



CONCENTRAÇÃO: Mét. densitários

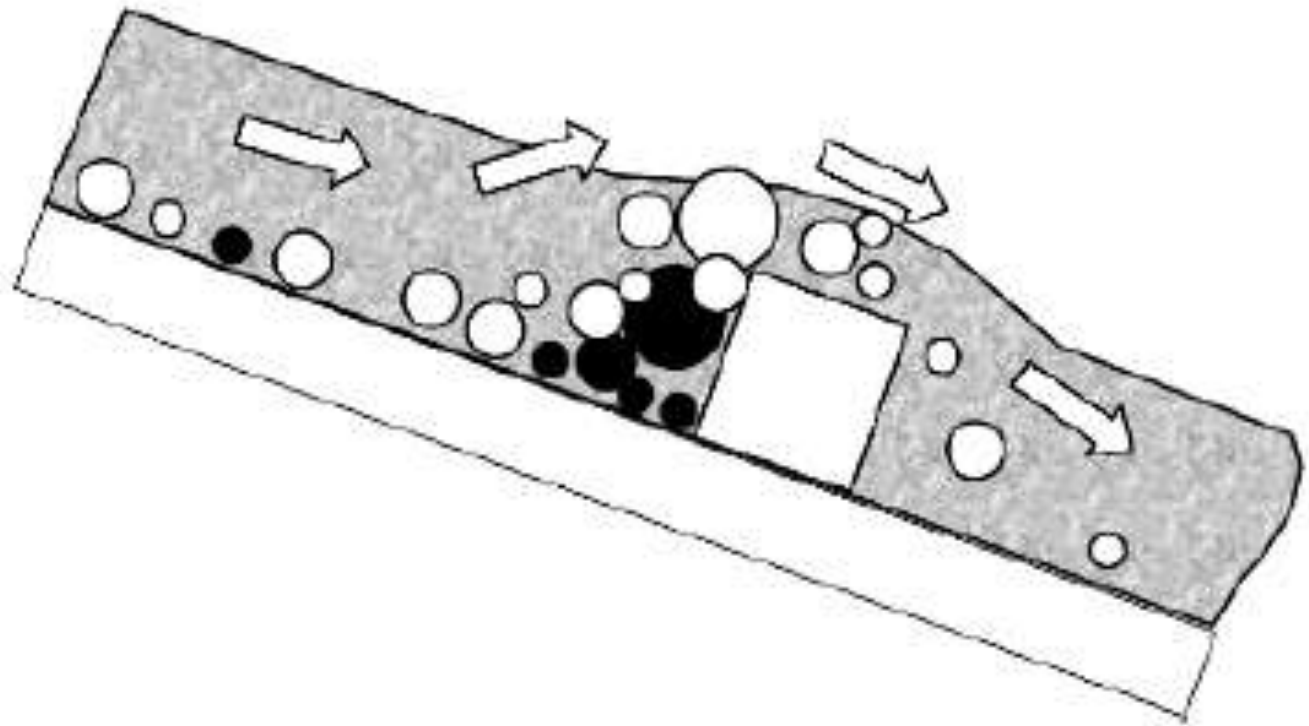


Fig. 15.14. Effect of a riffle on segregation on a sluice.

CONCENTRAÇÃO: Mét. densitários

- Separação em meio denso:
 - ▣ Líquidos densos ou meios com partículas de densidade conhecida;
 - ▣ 0,5 a 20 mm



CONCENTRAÇÃO: Mét. densitários

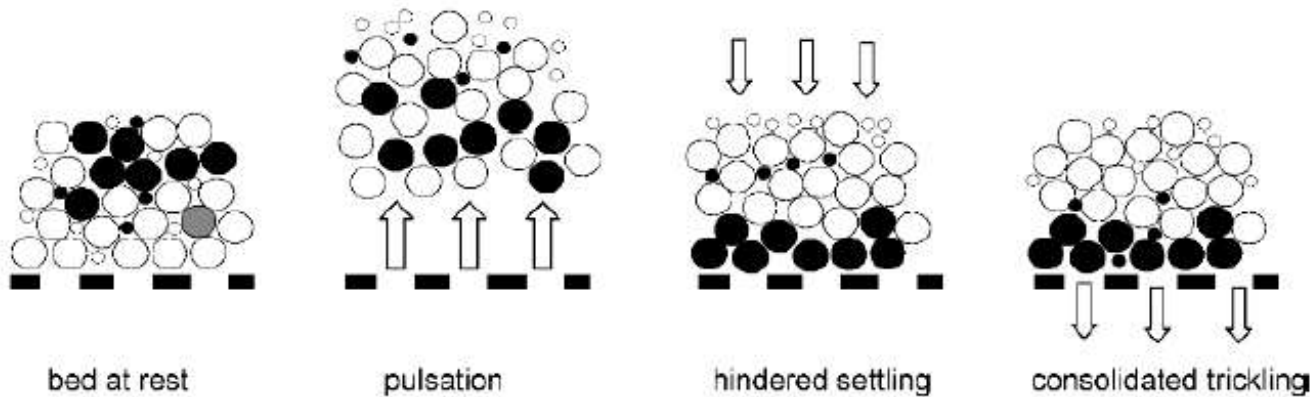
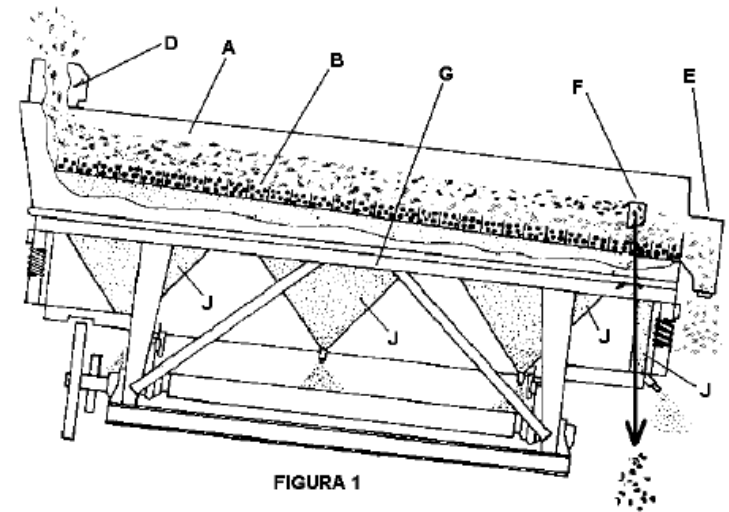


Fig. 15.6. Expansion and contraction of a bed of particles due to jigging action.

Fonte: Gupta, 2006

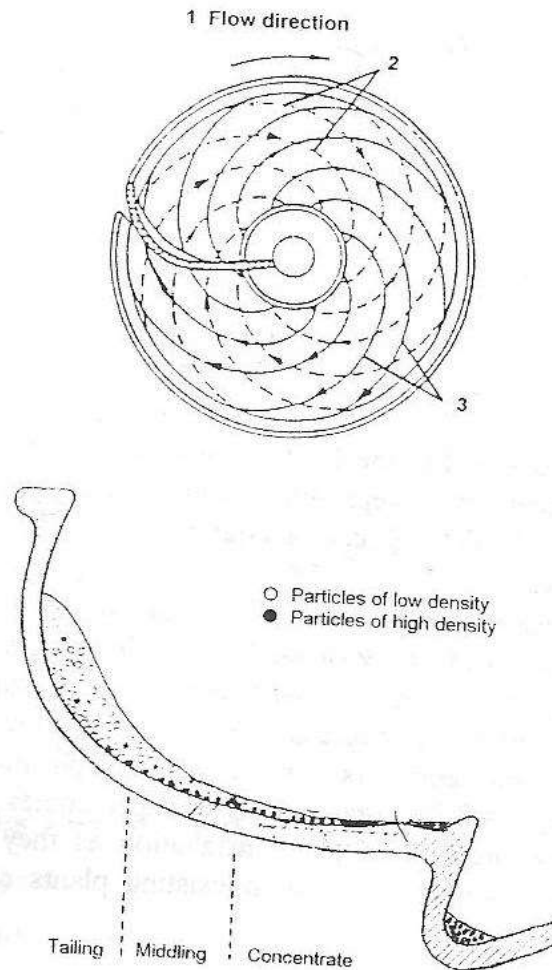
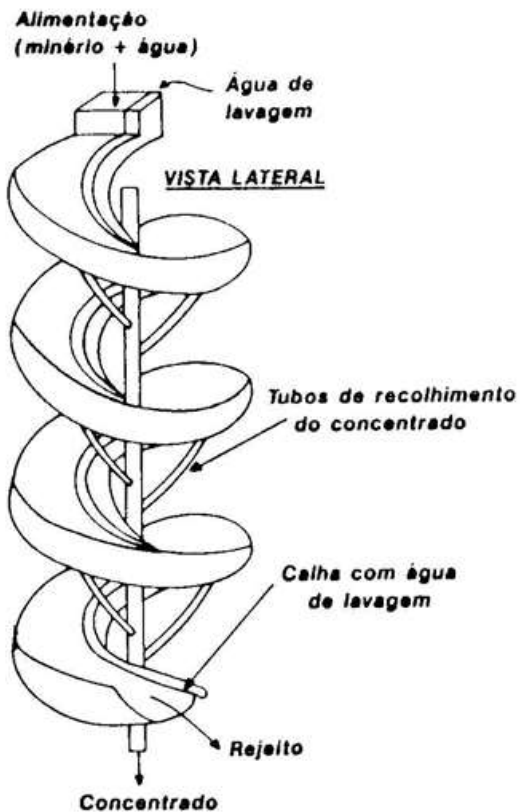


- REFUGO "FLUTUANTE" DE TODOS OS TAMANHOS
- PARTÍCULAS PESADAS (GROSSOS)
- PARTÍCULAS PESADAS (FINOS)

CONCENTRAÇÃO: Mét. densitários

□ Espirais:

□ 0,05 a 2 mm.



CONCENTRAÇÃO: Mét. densitários

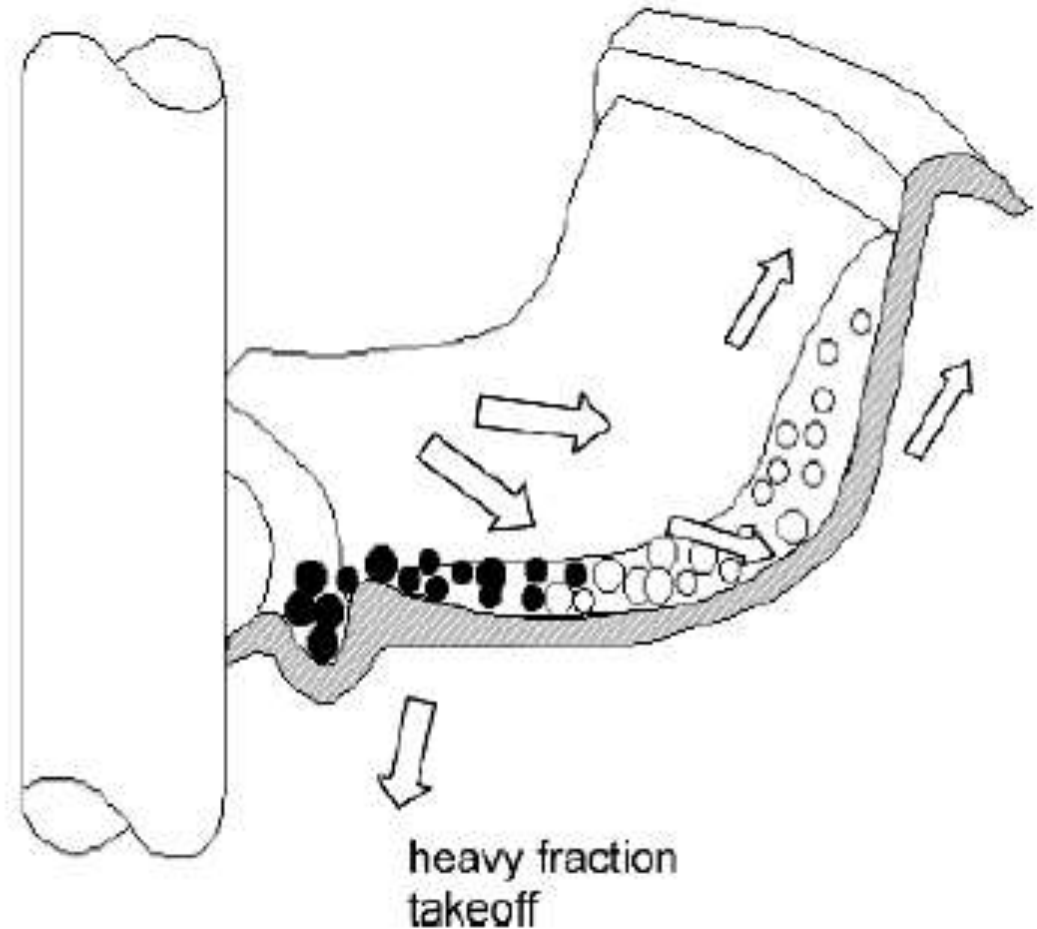


Fig. 15.15. Cross section of a spiral launder.

CONCENTRAÇÃO: Mét. densitários

- Mesa vibratória:
 - ▣ 0,07 a 1 mm.



CONCENTRAÇÃO: Mét. densitários

- Aplicabilidade de processos gravimétricos (Taggart, 1945):

$$\textit{Critério de concentração} = \frac{\rho_d - \rho_f}{\rho_l - \rho_f}$$

- Onde:
 - ρ_d é a densidade do mineral denso;
 - ρ_f é a densidade do fluído;
 - ρ_l é a densidade do mineral leve

Obs.: Pode-se levar em conta também a forma das partículas.

CONCENTRAÇÃO: Mét. densitários

- Valores do critério de concentração e dificuldade de separação

CC	Dificuldade
>2,5	Separação eficiente até 0,074 mm
2,5-1,75	Separação eficiente até 0,147 mm
1,75-1,5	Separação possível até 1,4 mm, porém difícil
1,5-1,2	Separação possível até 6 mm, porém difícil

CONCENTRAÇÃO: Mét. densitários

□ Exemplos:

- Separação de quartzo (densidade de 2.650 kg/m³) e ilmenita (densidade de 4.700 kg/m³) em água (densidade de 1.000 kg/m³):

$$\textit{Critério de concentração} = \frac{4700-1000}{2650-1000} = 2,2$$

CONCENTRAÇÃO: Mét. densitários

□ Exemplos:

- Separação de quartzo (densidade de 2.650 kg/m³) e ilmenita (densidade de 4.700 kg/m³) em líquido denso (densidade de 1.500 kg/m³):

$$\textit{Critério de concentração} = \frac{4700-1500}{2650-1500} = 2,8$$

CONCENTRAÇÃO: Mét. densitários

□ Exemplos:

- Separação de quartzo (densidade de 2.650 kg/m³) e ilmenita (densidade de 4.700 kg/m³) em ar (densidade de 1,2 kg/m³):

$$\textit{Critério de concentração} = \frac{4700-1,2}{2650-1,2} = 1,8$$

- Os exemplos indicam que a separação de partículas a seco (pneumática) é de aplicação mais limitada e exige uma alimentação com intervalos de tamanhos mais estreitos que a separação a úmido.

CONCENTRAÇÃO: Mét. densitários

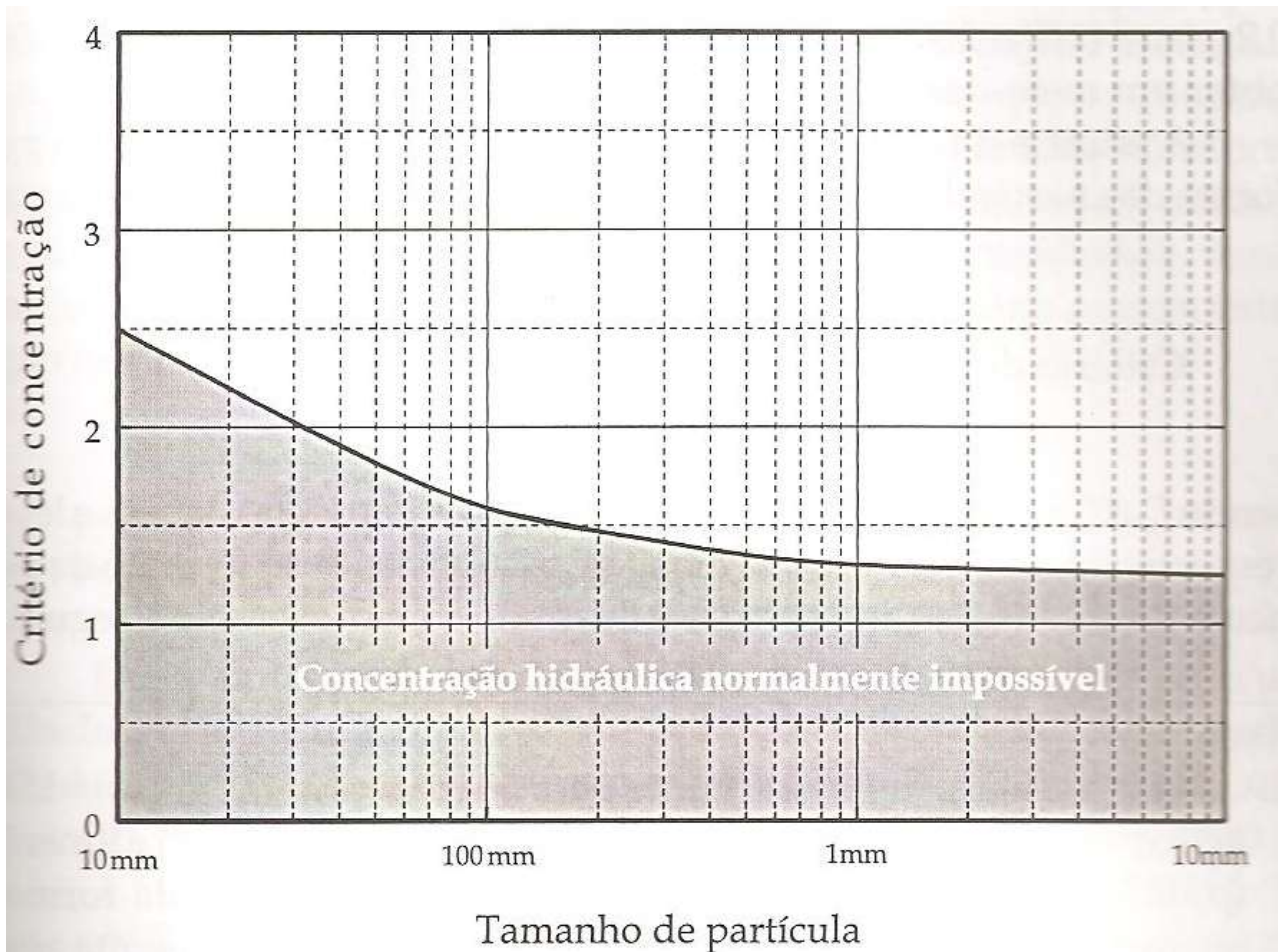


Figura 3.1. Limites de aplicabilidade de equipamentos modernos de concentração gravimétrica. Fonte: Sampaio, 2005

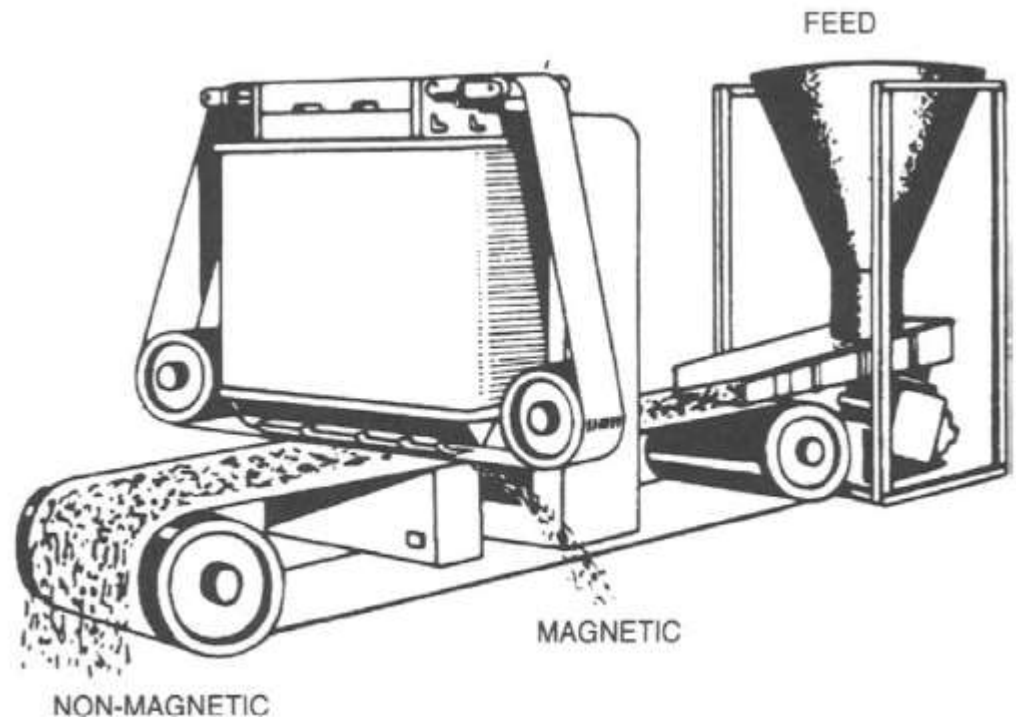
Separação magnética

- Capítulo 8 do livro:
- Teoria e prática do Tratamento de Minérios: Britagem, peneiramento e moagem. Volume 6. 2013. 1 edição. Autores: Arthur Pinto Chaves e Rotênio Castelo Chaves Filho



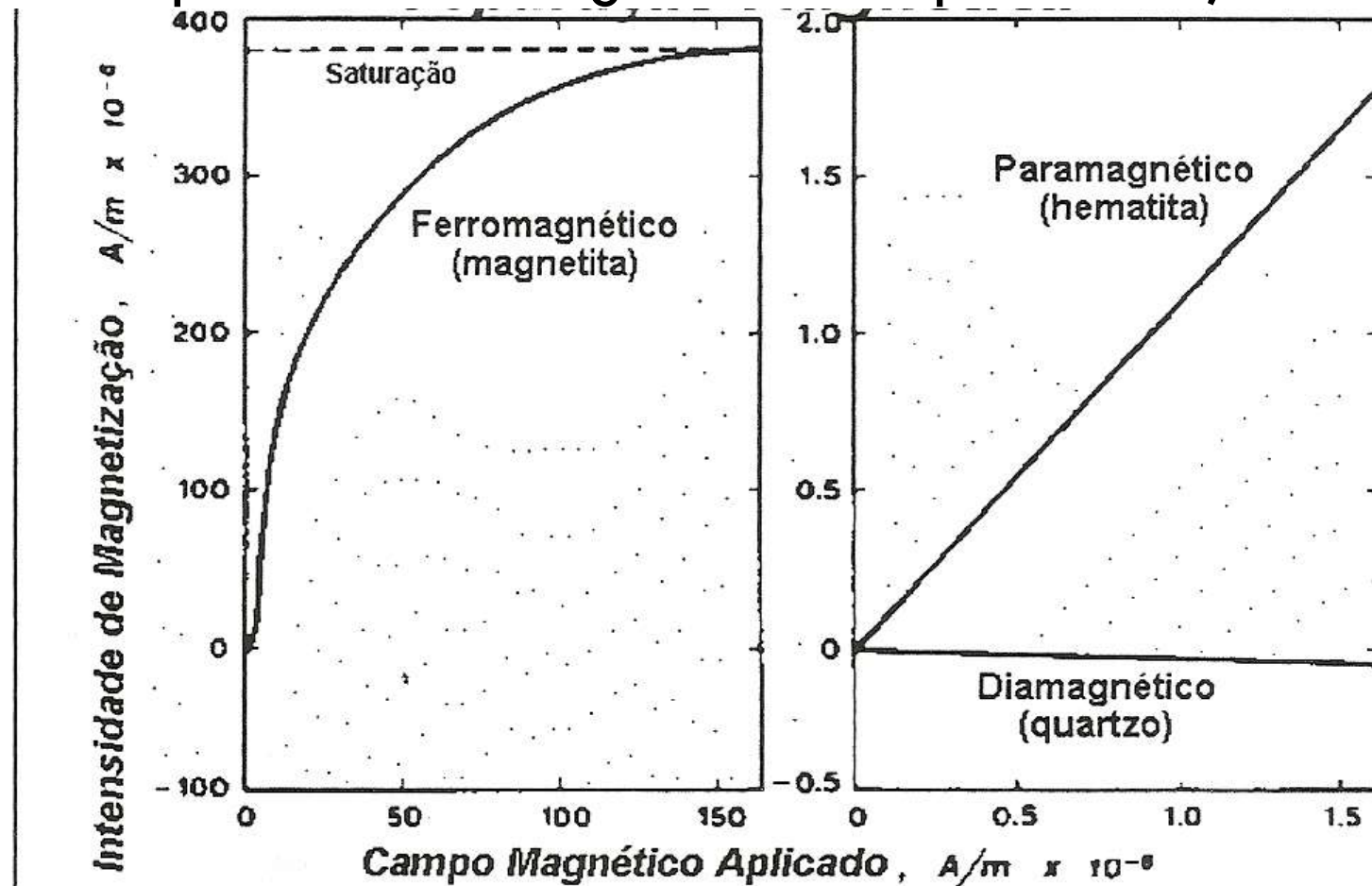
CONCENTRAÇÃO: Separação magnética

- Susceptibilidade magnética das partículas;
- Seco: 0,074 a 5 mm;
- Úmido: 0,001 a 5 mm.



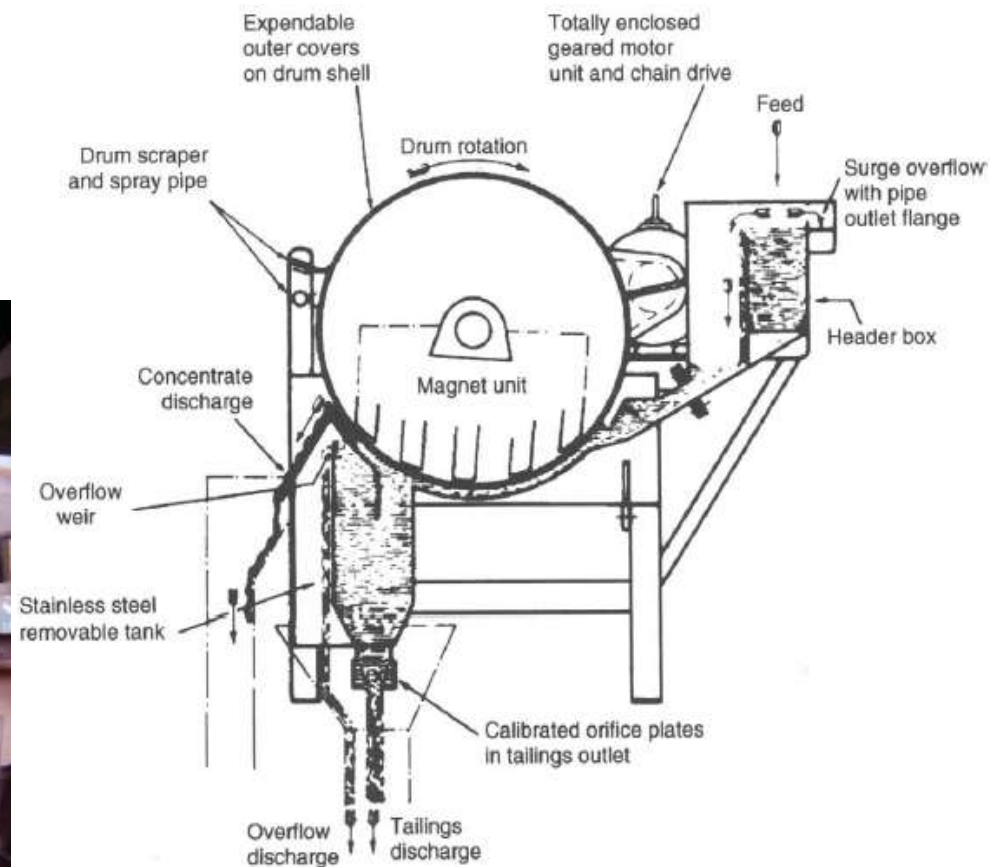
CONCENTRAÇÃO: Métodos magnéticos

- Susceptibilidade magnética das partículas;



CONCENTRAÇÃO: Métodos magnéticos

□ Separador de rolos



3.6 Drum separator

CONCENTRAÇÃO: Métodos magnéticos

□ Separador Jones

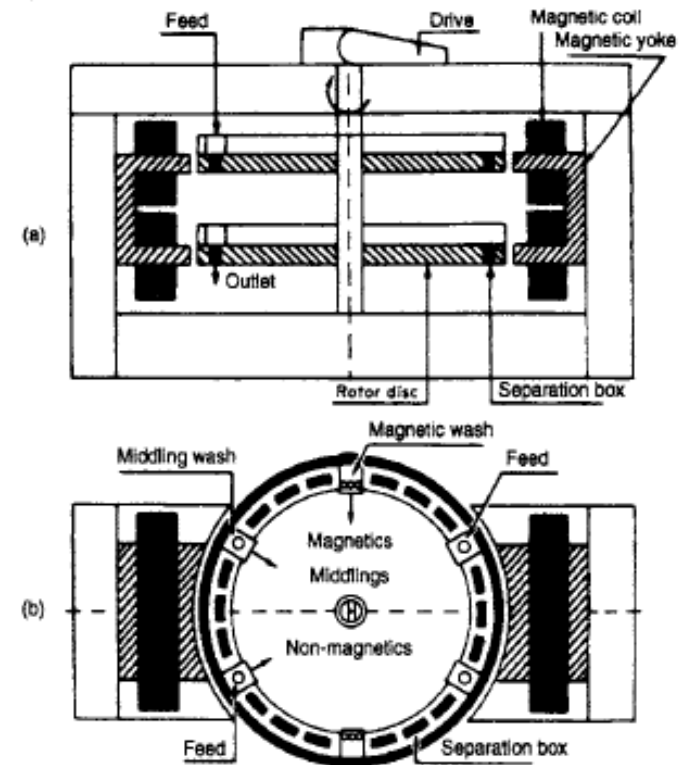


Figure 13.12 Operating principle of the Jones high-intensity wet magnetic separator in cross-section (a) plan and (b) view Fonte: Wills, 2006

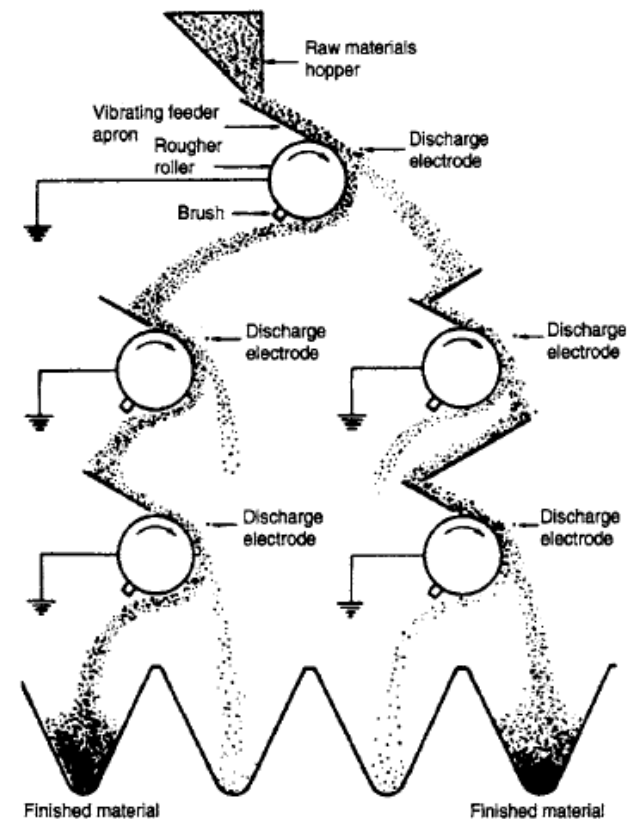
Separação eletrostática

- Capítulo 9 do livro:
- Teoria e prática do Tratamento de Minérios: Britagem, peneiramento e moagem. Volume 6. 2013. 1 edição. Autores: Arthur Pinto Chaves e Rotênio Castelo Chaves Filho



CONCENTRAÇÃO: Separação eletrostática

- Condutibilidade elétrica das partículas / temperatura;
- Granulometrias de 0,05 a 3 mm.



CONCENTRAÇÃO: Separação eletrostática

- Condutibilidade elétrica das partículas

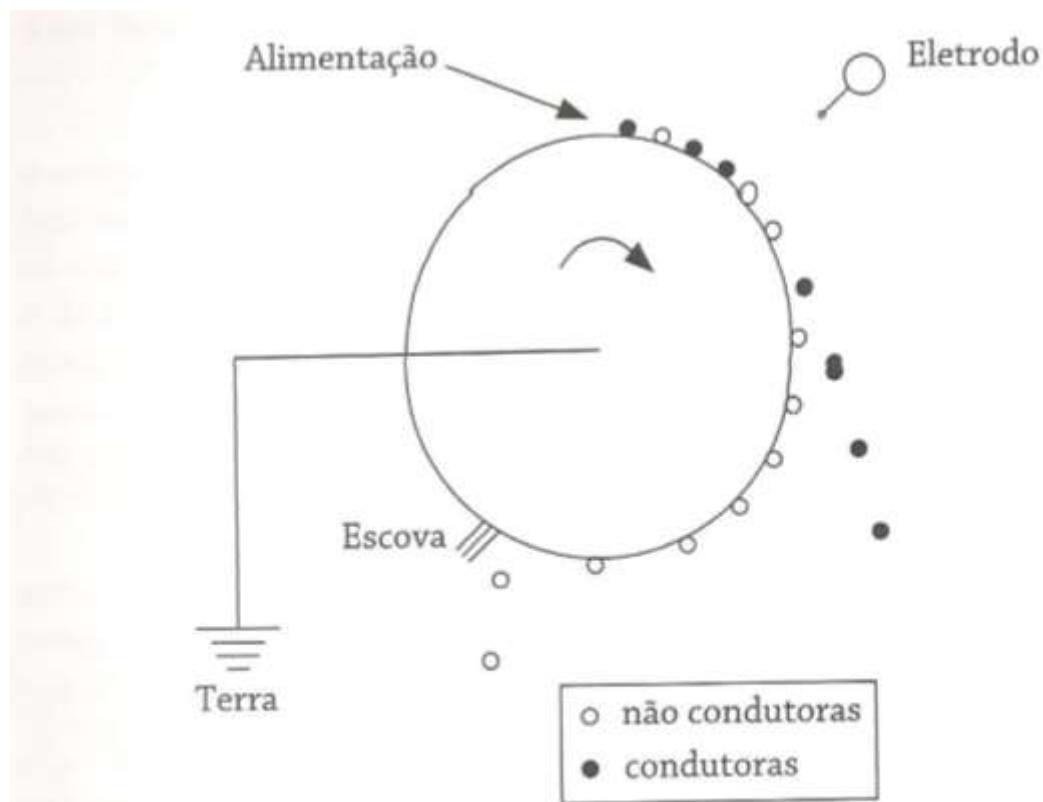


Figura 6.9 - Separador eletrostático de tambor

CONCENTRAÇÃO: Separação eletrostática

□ Condutibilidade elétrica das partículas

Tabela 6.4 - Comportamento típico de alguns minerais no separador eletrostático de tambor

Minerais que se prendem ao tambor (NC)	Minerais que não se prendem ao tambor (C)
Apatita	Cassiterita
Barita	Cromita
Calcita	Galena
Cianita	Goethita
Coríndon	Ouro
Garnierita	Hematita
Gibbsita	Estibnita
Gipsita	Ilmenita
Monazita	Magnetita
Quartzo	Pirita
Scheelita	Rutilo
Sillimanita	Esfalerita
Turmalina	Tantalita
Zircão	Wolframita

CONCENTRAÇÃO: Separação eletrostática

- Condutibilidade elétrica das partículas

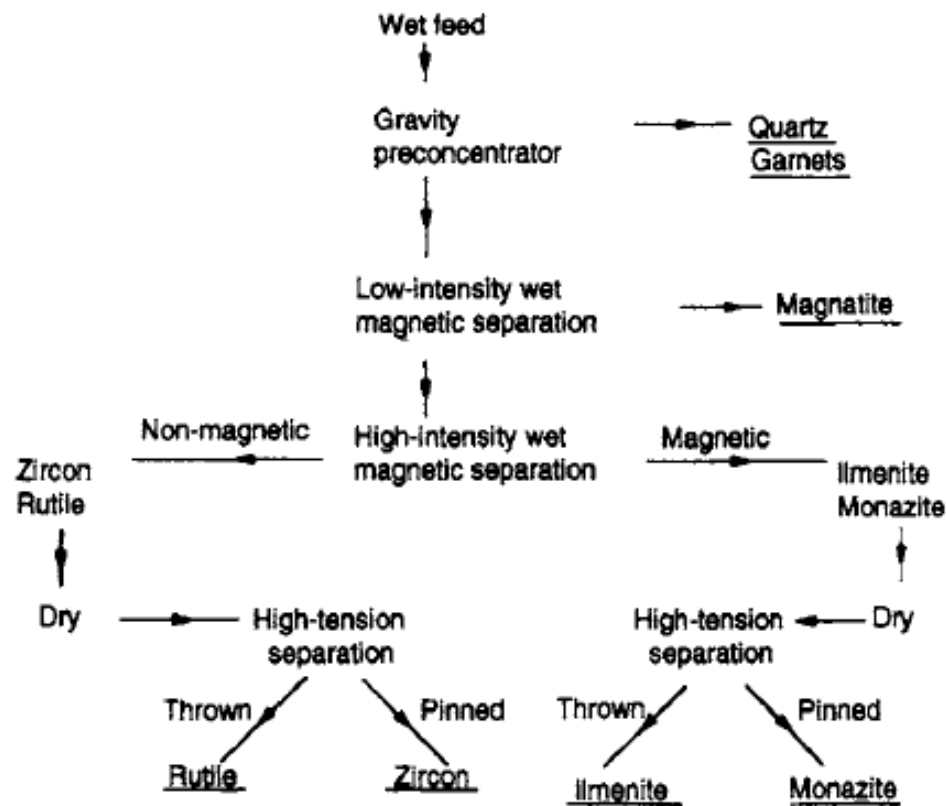
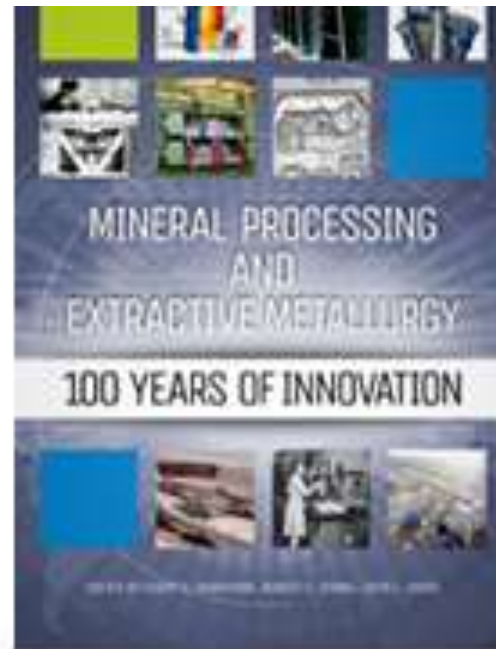


Figure 13.26 Typical beach sand treatment flowsheet

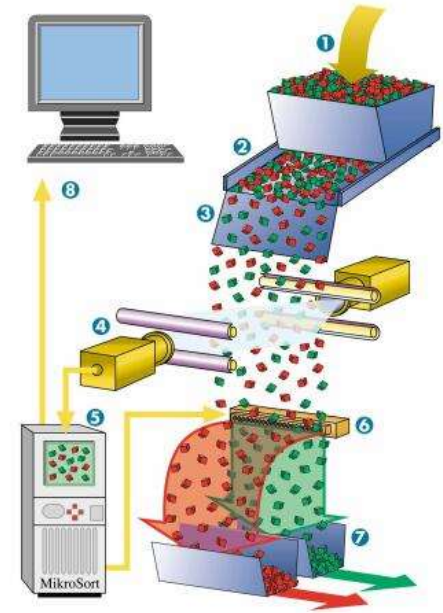
Ore sorting

- Págs. 209 a 221 do livro:
- Mineral processing and extractive metallurgy: 100 years of innovation. 2014. 1 edição. Autores: Corby G. Anderson, Robert C. Dunne, John L. Uhrie



CONCENTRAÇÃO: Ore sorting

- Diversas propriedades das partículas: brilho, cor, radiação, magnetismo, química, etc;
- Granulometrias maior que 5 até 300 mm.



CONCENTRAÇÃO: Ore sorting


	[m]		Sensor/Technology	Material Property	Sorter application
Gamma-radiation	10^{-12}		RM (Radiometric)	Natural Gamma Radiation	Radioactive Ores
X-ray	10^{-11}		XRT (X-ray Transmission)	Atomic Density	Base and Heavy Metal Ores Precious Metal Ores Industrial Minerals, Coal, Diamonds, Scrap Metals
	10^{-10}		XRF	Visible Fluorescence under X-rays	Diamonds
Ultraviolet (UV)	10^{-9}				
Visible light (VIS)	10^{-8}		COLOR (CCD Color Camera)	Reflection, Absorption, Transmission	Base Metal Ores Precious Metal Ores Industrial Minerals Diamonds, Glass
	10^{-7}				
Near Infrared (NIR)	10^{-6}		PM (Photometric)	Monochromatic Reflection/Absorption	Industrial Minerals Precious Stones Diamonds
Infrared (IR)	10^{-5}				
	Microwaves		10^{-4}	NIR (Near Infrared Spectrometry)	Reflection, Absorption
10^{-3}					
Radio Waves	10^{-2}	IR (Infrared Camera)	Heat conductivity, heat <i>dissipation</i>	Base Metal Sulphide Ores Precious Metal Ores Industrial Minerals Graphite, Coal	
	10^{-1}				
	10^0				
Alternating Current (AC)	10^1	EM (Electro-Magnetic Sensor)	Conductivity, Permeability	Base Metal Sulphide Ores Scrap metals	

Figure 3. Sensors along the electromagnetic spectrum (Wotruba 2011)

CONCENTRAÇÃO: Ore sorting

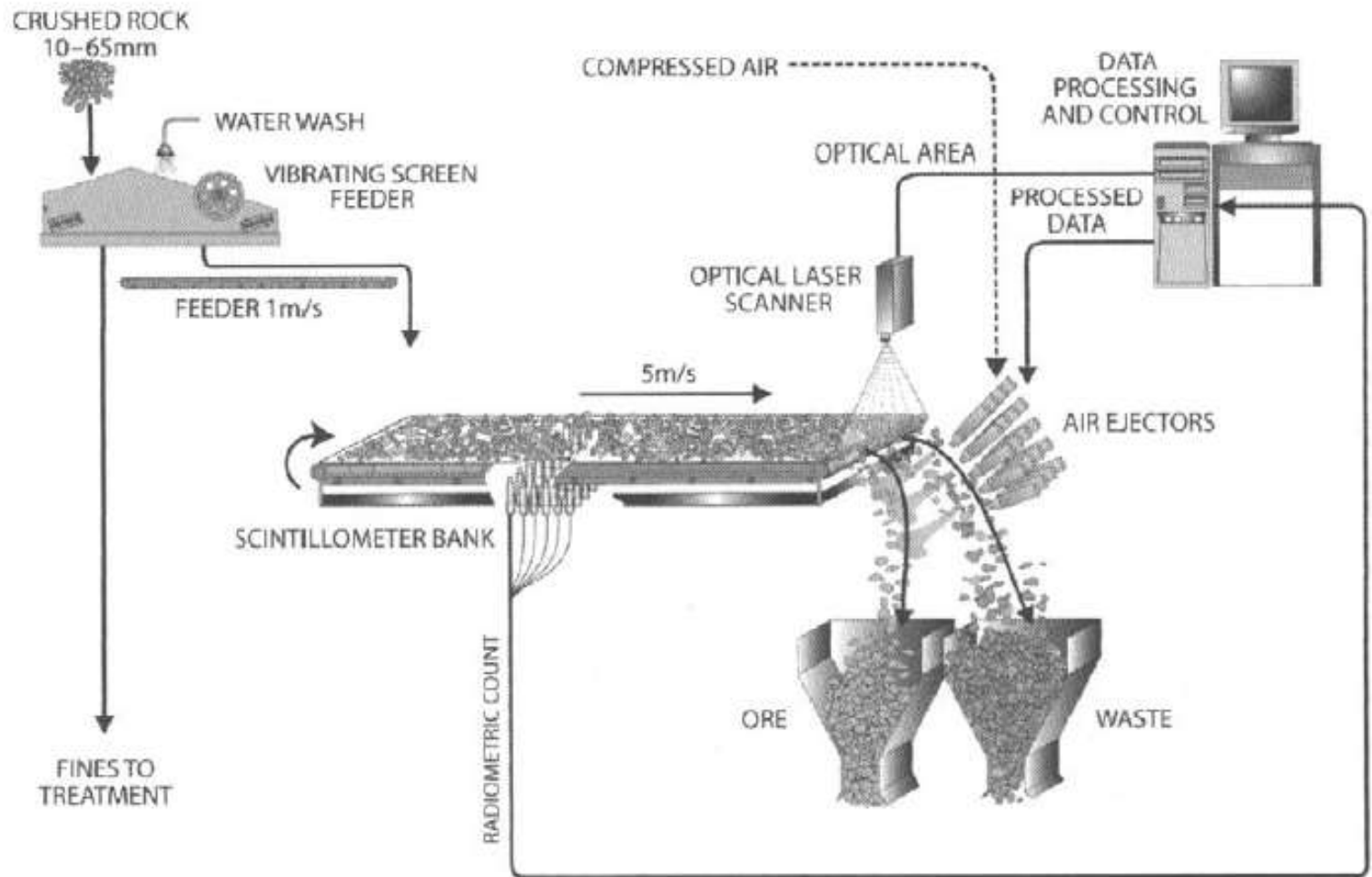


Figure 14.4 The Ultrasort radiometric sorter (Courtesy Ultrasort Pty Ltd)

Ore sorting

- <http://www.steinert.de/home/products/x-ray-sorting-system-xssr/>
- <http://www.steinert.de/home/products/color-sorting-systems-fssr/>
- <http://www.steinert.de/home/products/induction-sorting-system-issr/>

FONTES:

- Mineral Processing Technology – Barry Wills e Tim Nappier-Munn. 2006.
- Chaves, A. P. Teoria e prática do tratamento de minérios. Vol. 1 e 4. 2006.
- Valadão, G. E. S.; Araujo, A. C. Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- Sampaio, Carlos Hoffman; Beneficiamento gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2005.
- Gupta, A.; Yan, D.; **Mineral processing design and operation: an introduction**. Elsevier, 2006. 693 p. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/book/9780444516367>>
- Imagens e vídeos google images
- Imagens do autor