



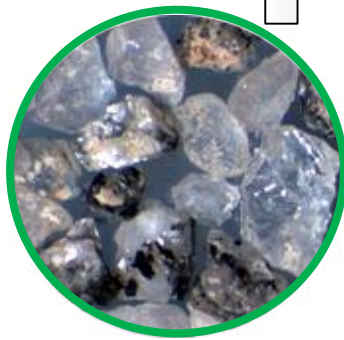
# CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MATÉRIAS PRIMAS MINERAIS

## ***ANÁLISE DOS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO MINERAL***

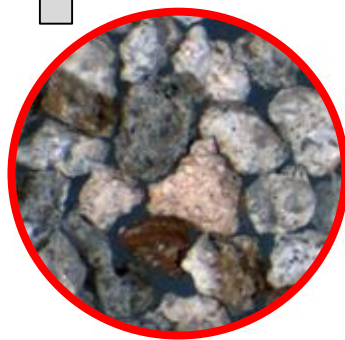
Prof. Dr. Henrique Kahn  
Dra. Manuela Tassinari  
Profa. Dra. Carina Ulsen



# PROCESSAMENTO MINERAL



*Product  
recycled sand*

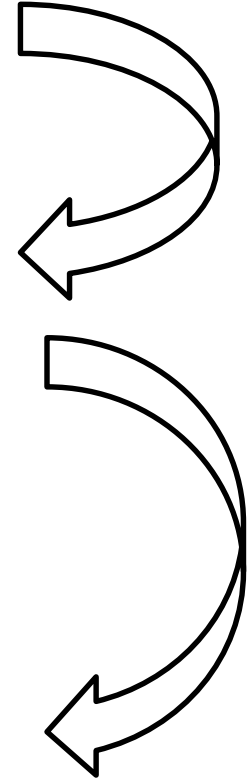


*Waste  
high porosity particles*

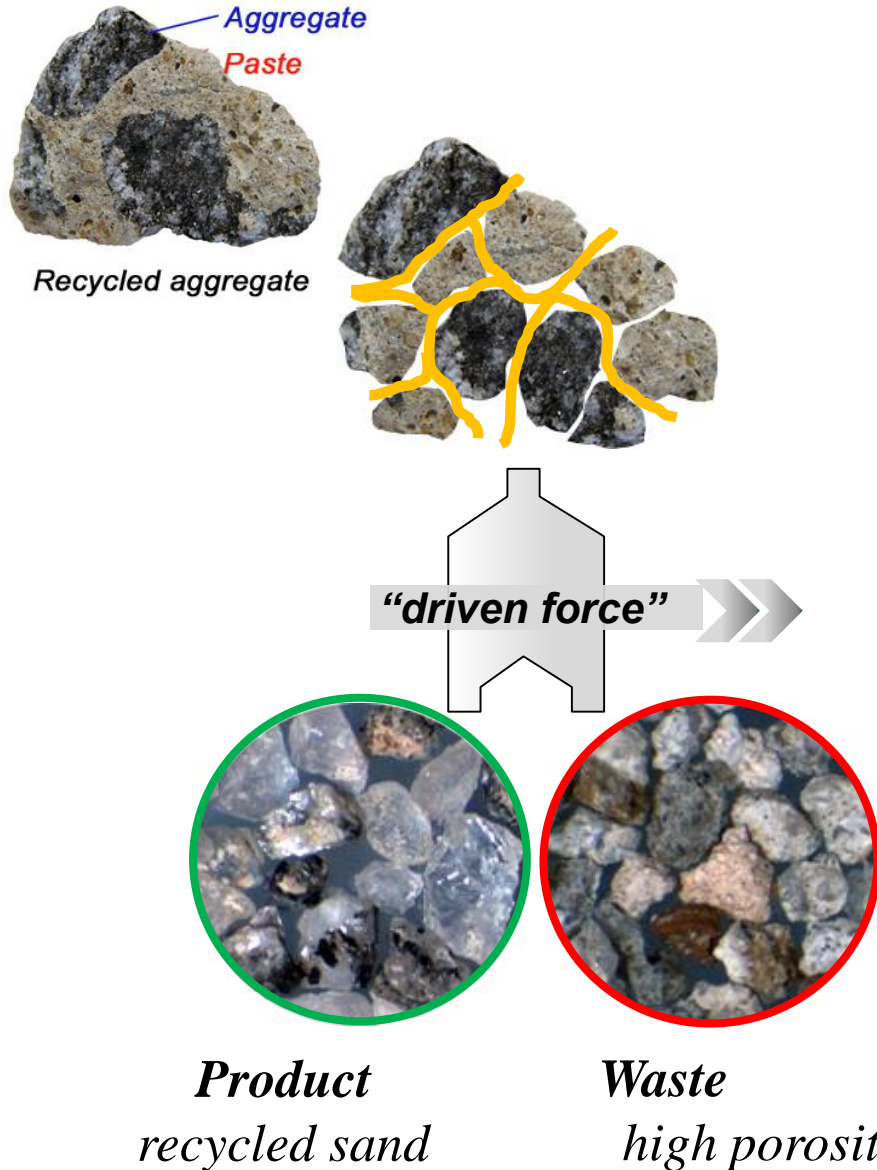
**(1) Comminution**

**(2) Separation**

**(3) Products  
characterization**



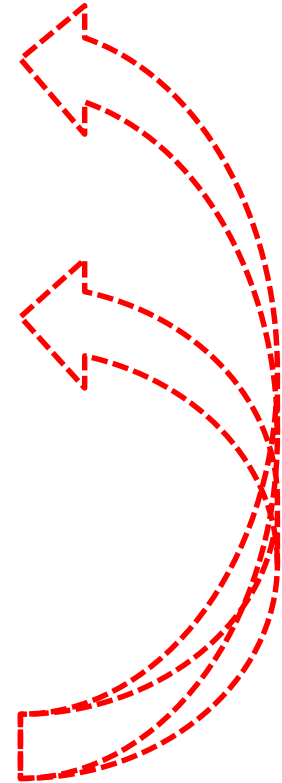
# PROCESSAMENTO MINERAL



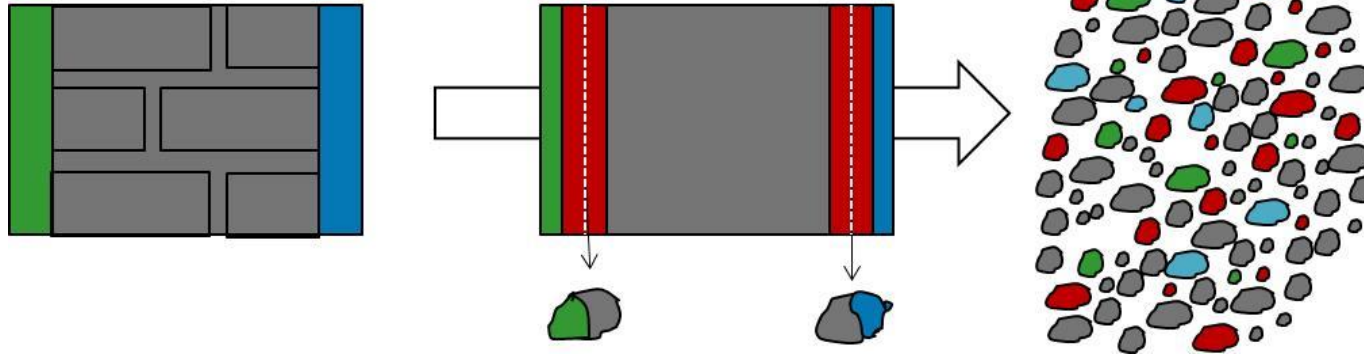
**(1) Comminution**

**(2) Separation**

**(3) Products characterization**



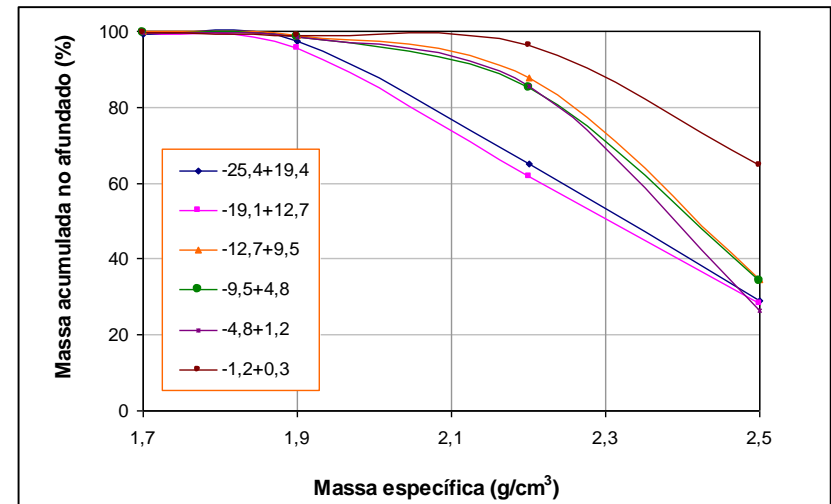
# PROCESSAMENTO MINERAL



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

## COMMINUTION

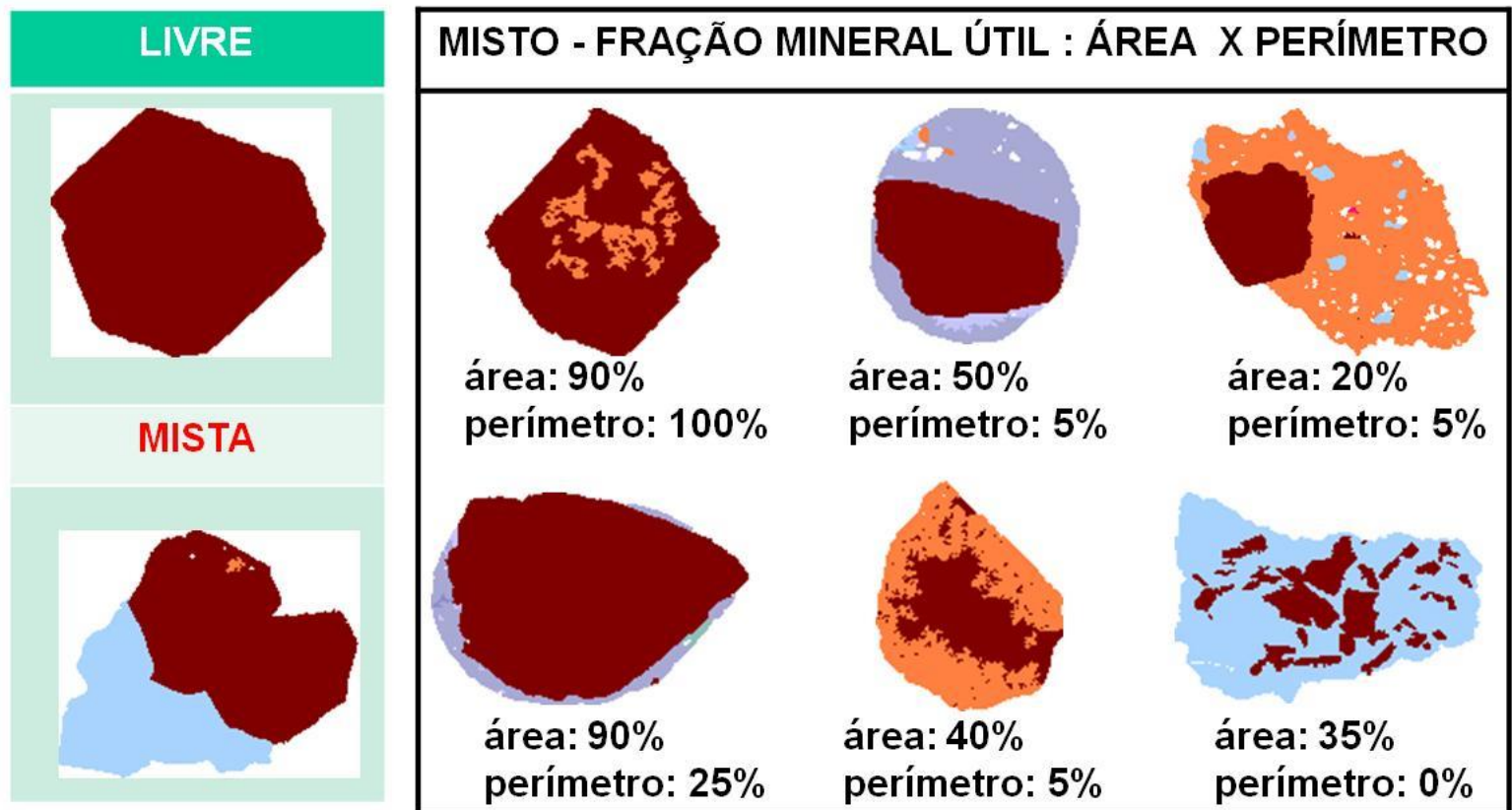
- Particle size for liberation
- Mechanism/Equipment



# PROCESSOS DE SEPARAÇÕES FÍSICAS

## Requisitos básicos:

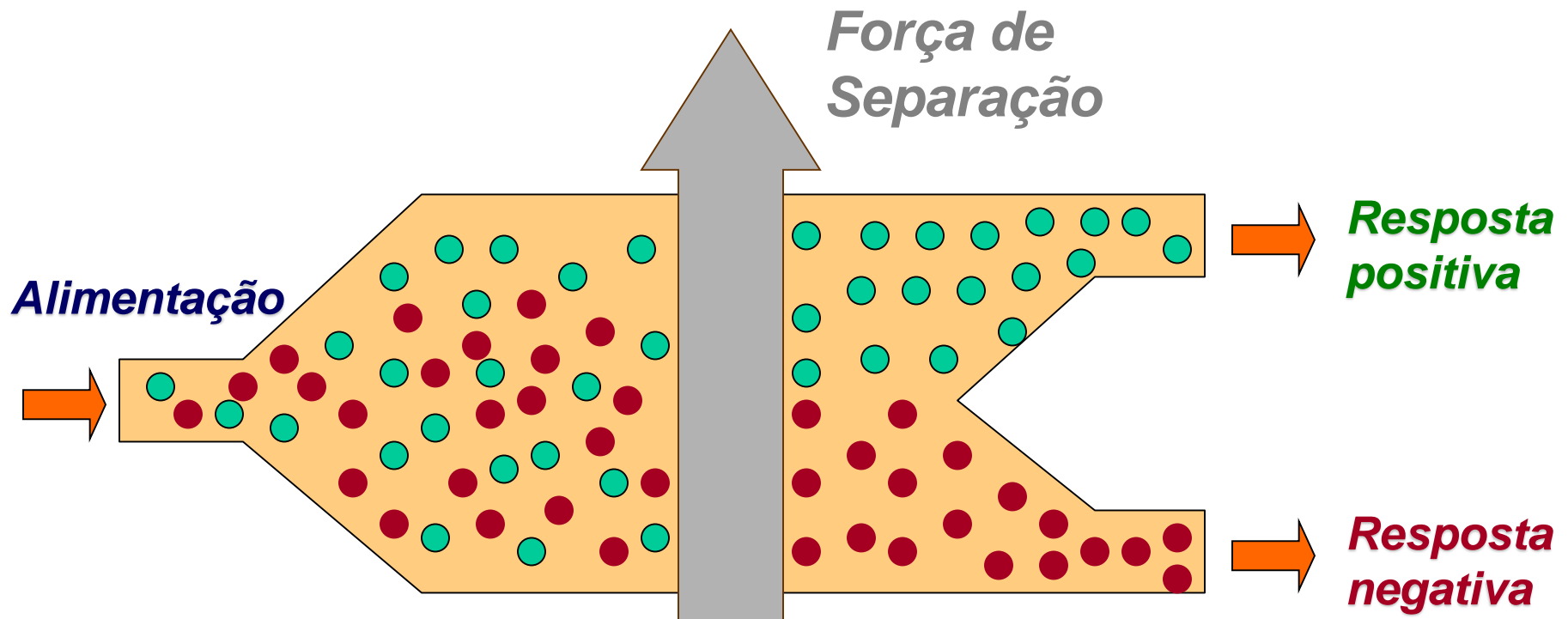
1. o(s) mineral(ais) útil(eis) deve(m) ocorrer em grãos livres (susceptíveis à uma separação física)



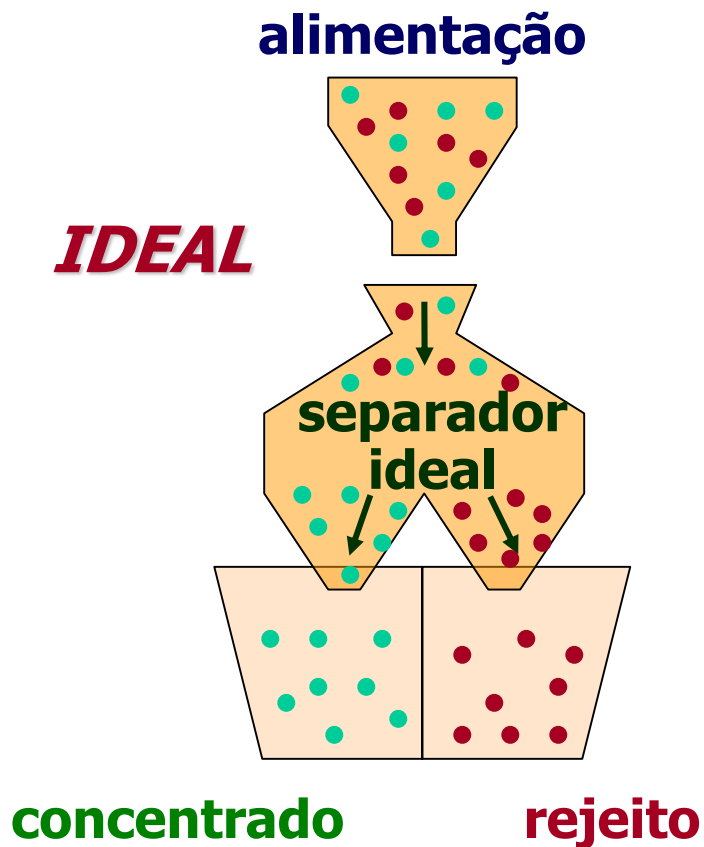
# ***PROCESSOS DE SEPARAÇÕES FÍSICAS***

Requisitos básicos:

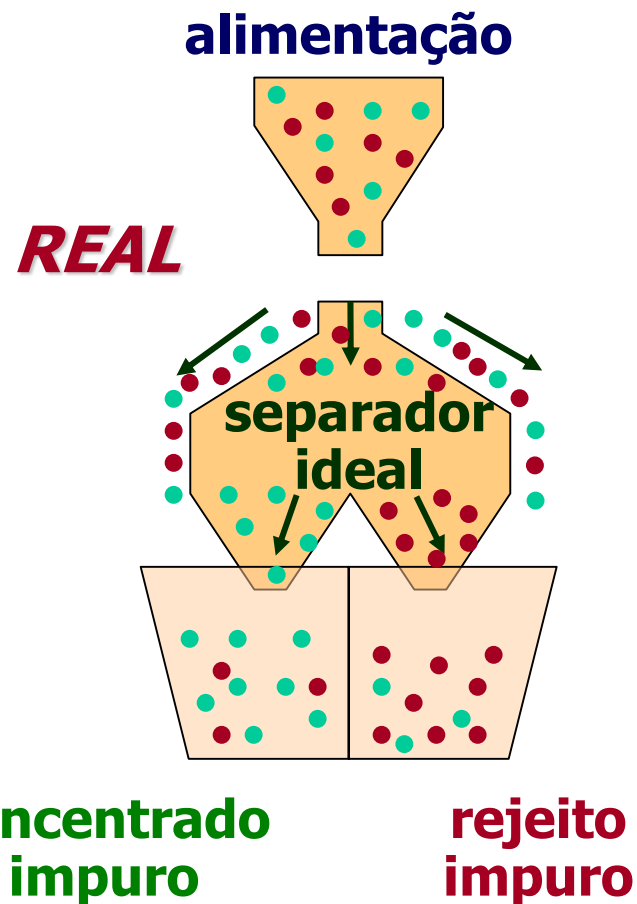
2. existência de uma propriedade física diferencial entre mineral(is) útil(eis) e mineral(is) de ganga



# PROCESSO DE SEPARAÇÃO FÍSICA

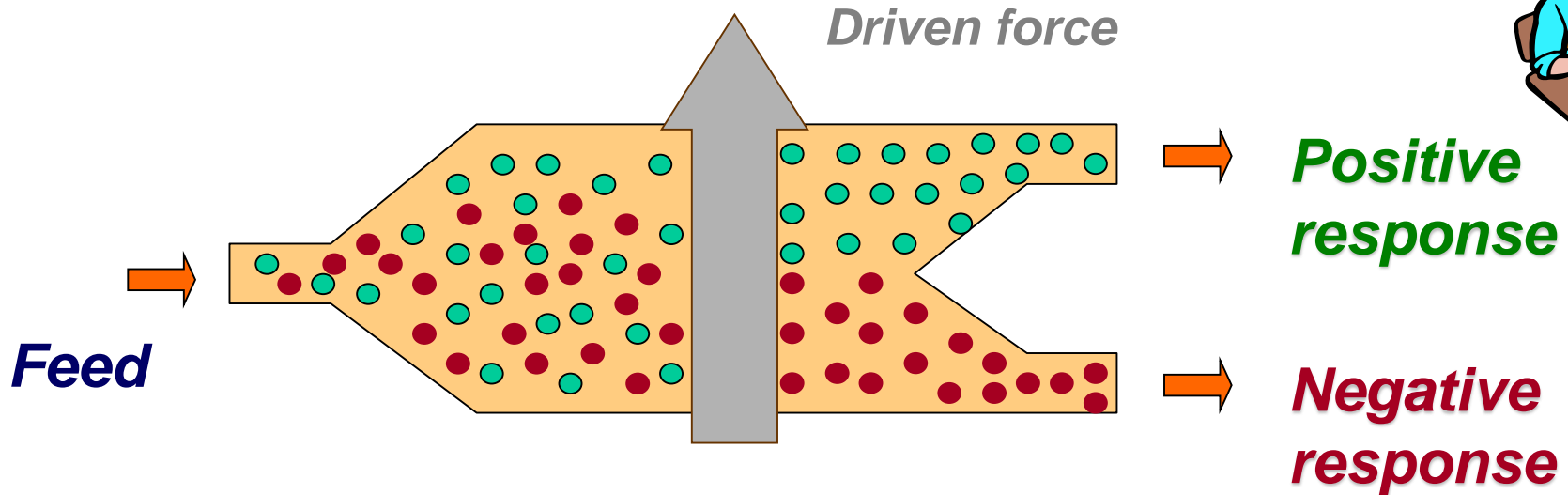


***CARACTERIZAÇÃO***



***BENEFICIAMENTO MINERAL***

# PROCESSAMENTO MINERAL



## SEPARATION

- What to separate
- Differential properties
- How to separate



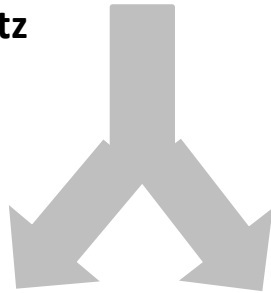
- densidade
- físico-química de superfície
- susceptibilidade magnética
- condutibilidade elétrica



# PROCESSAMENTO MINERAL – EXEMPLO OURO



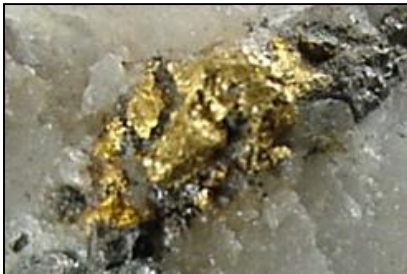
Gold + Quartz



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

# ***PROPRIEDADES RELEVANTES***

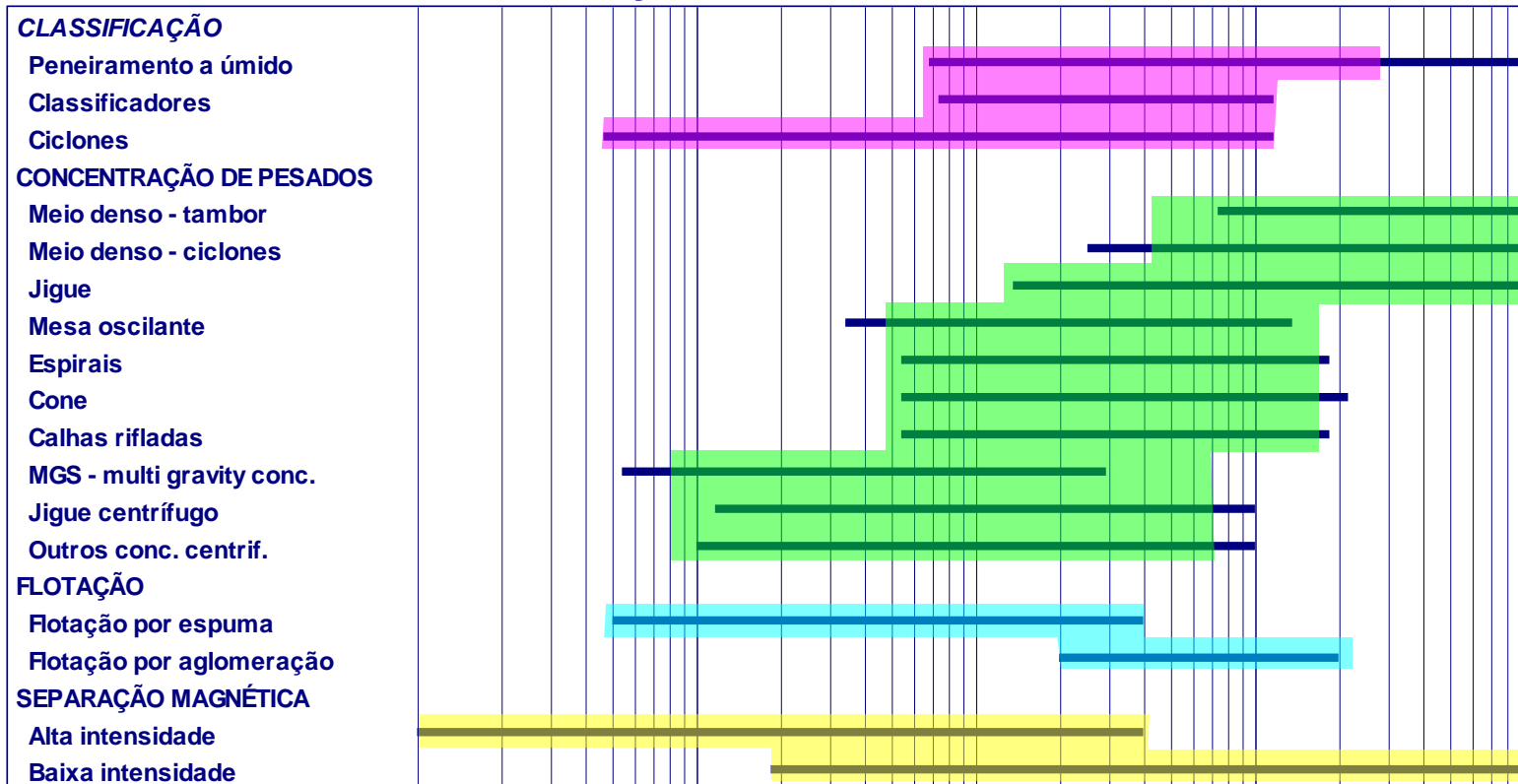
- ❑ *Concentração densitária:*
  - *densidades relativas (partículas e meio)*
  - *granulação*
- ❑ *Flotação:*
  - *físico-química de superfície das partículas*
  - *granulação*
- ❑ *Separação Magnética:*
  - *susceptibilidade magnética*
  - *granulação*
- ❑ *Separação Eletrostática:*
  - *condutibilidade elétrica / temperatura*
  - *granulação*
- ❑ *“Sorting”*
  - *propriedades ópticas*
  - *granulação*

# ***PROPRIEDADES RELEVANTES***

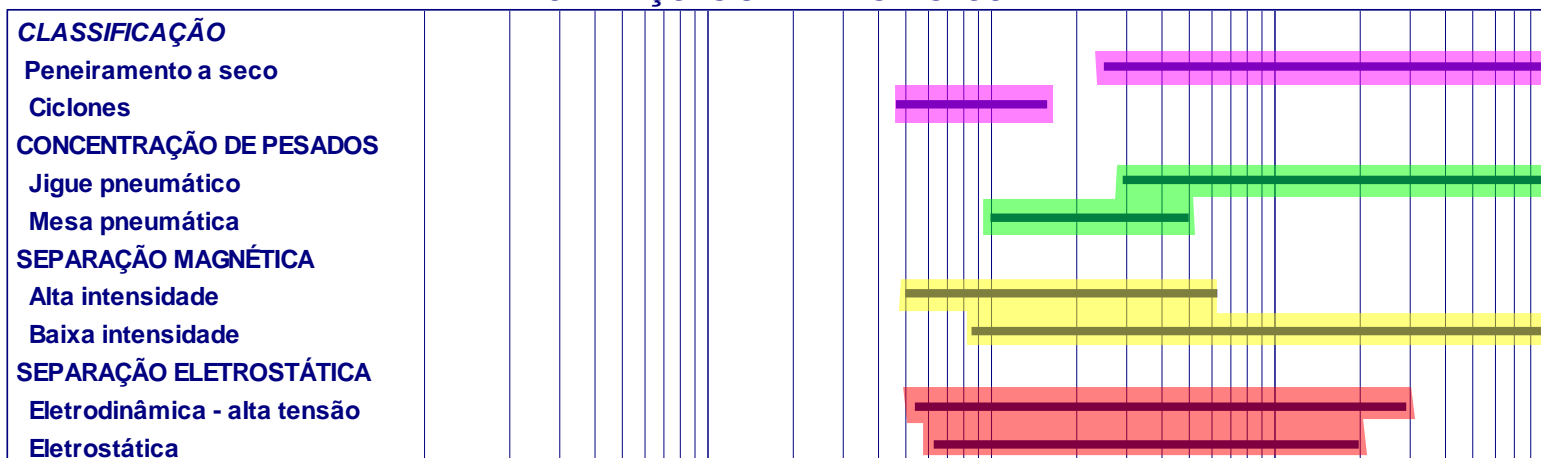
- ❑ *Concentração densitária:*
  - *densidades relativas (partículas e meio)*
  - **granulação**
- ❑ *Flotação:*
  - *físico-química de superfície das partículas*
  - **granulação**
- ❑ *Separação Magnética*
  - *susceptibilidade magnética*
  - **granulação**
- ❑ *Separação Eletrostática*
  - *condutibilidade elétrica / temperatura*
  - **granulação**
- ❑ *“Sorting”*
  - *propriedades ópticas*
  - **granulação**

***Propriedade  
comum***

## OPERAÇÕES UNITÁRIAS A ÚMIDO



## OPERAÇÕES UNITÁRIAS A SECO



1µm      10µm      100µm      1mm      10mm

# ***ANÁLISE DOS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO - APLICAÇÕES***

- ❑ ***Previsão de facilidade / dificuldade da separação***
- ❑ ***Sugestão / seleção do(s) método(s) de concentração a ser(em) empregado(s)***
- ❑ ***Previsão de qualidade do produto final;***
- ❑ ***Estimativas de recuperação***
- ❑ ***Otimização de processos de separação***
- ❑ ***Otimização do planejamento de lavra***
- ❑ ***Simulação de processos de concentração***

# ***FERRAMENTAS DE ANÁLISE DOS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO***

- ❑ ***Balanço de massas e metalúrgico***
- ❑ ***Índices de eficiência***
- ❑ ***Curvas de separabilidade***
- ❑ ***Curvas de desempenho***

# ***BALANÇOS DE MASSAS E METALÚRGICO***

**Retratam o resultado final de uma separação:**

$$m_T = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_N$$

$$t_T = (m_1 \times t_1 + m_2 \times t_2 + \dots + m_N \times t_N) / (m_1 + m_2 + \dots + m_N)$$

**Critérios usuais de avaliação:**

▣ ***recuperação***

$$r_m = \frac{m_i}{\sum_1^N m_i} \times 100 (\%)$$

$$r_u = \frac{m_i \times t_i}{\sum_1^N m_i \times t_i} \times 100 (\%)$$

▣ ***relação de enriquecimento***

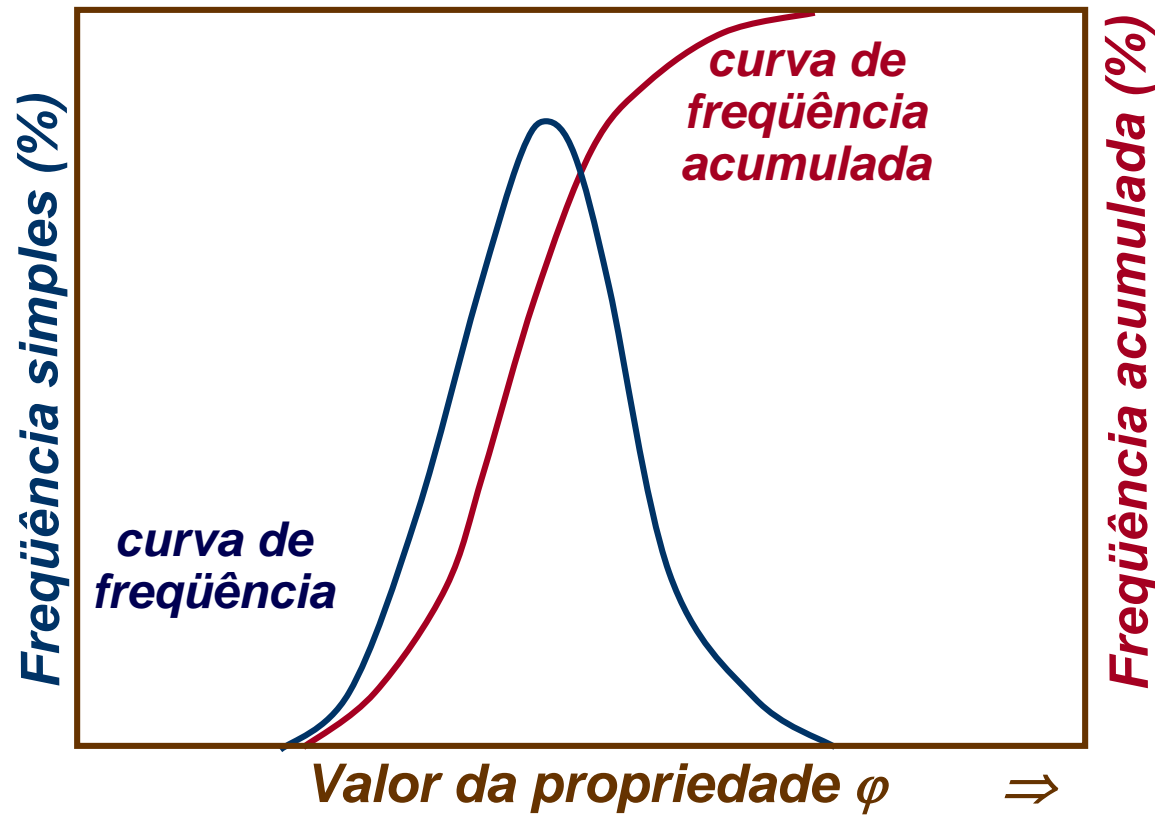
$$u = \frac{t_c}{t_A}$$

# ***CURVAS DE SEPARABILIDADE***

- **Representa a distribuição de uma propriedade física do minério**
  
- **Formas de representação:**
  - ***Gráficas:***
    - *histogramas;*
    - *curva de frequência (simples ou relativa)*
    - *curva de frequência acumulada*
  - ***Numéricas:***
    - *Funções matemáticas*



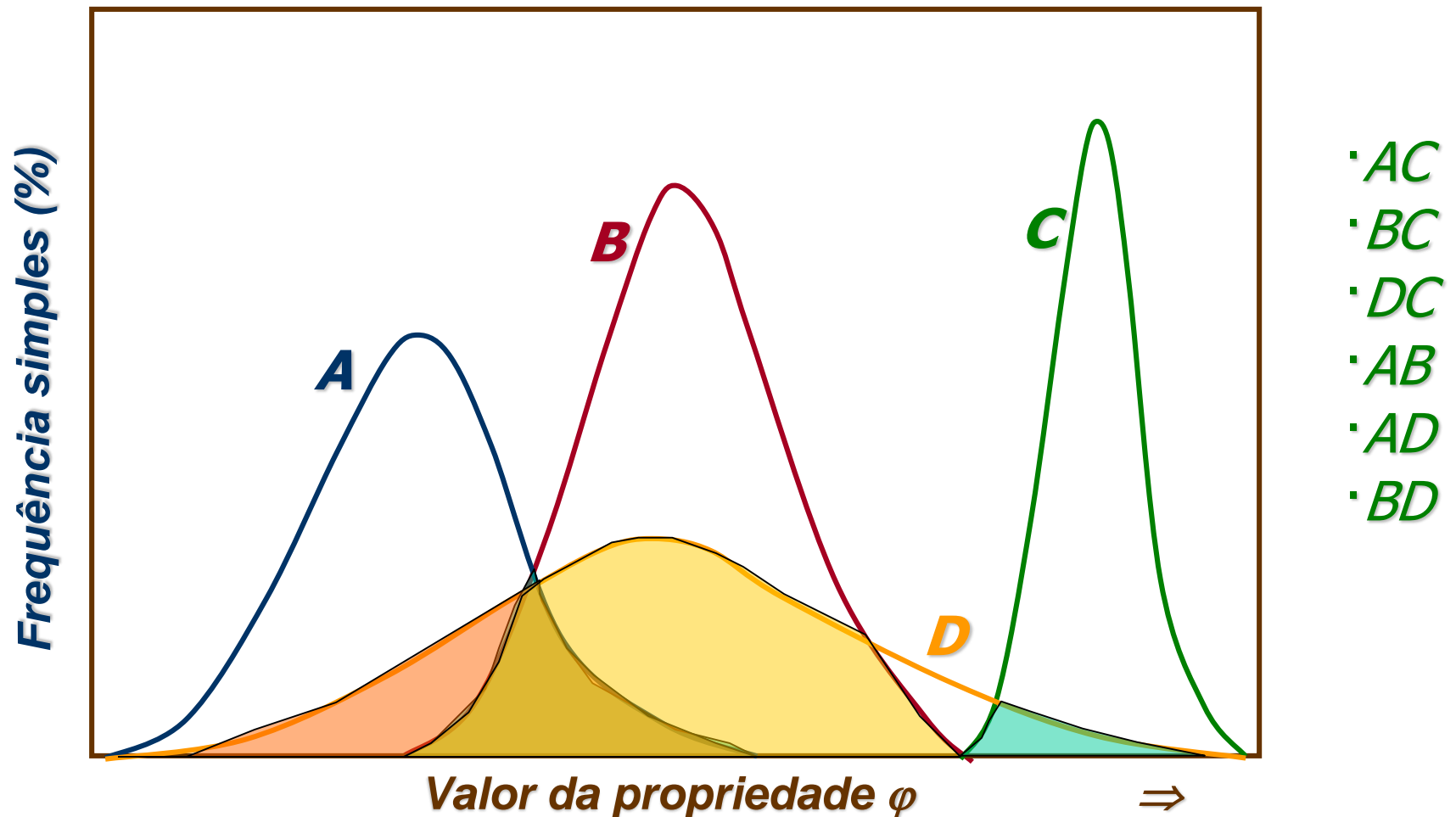
# FORMAS DE REPRESENTAÇÃO



# ***CURVAS DE SEPARABILIDADE***

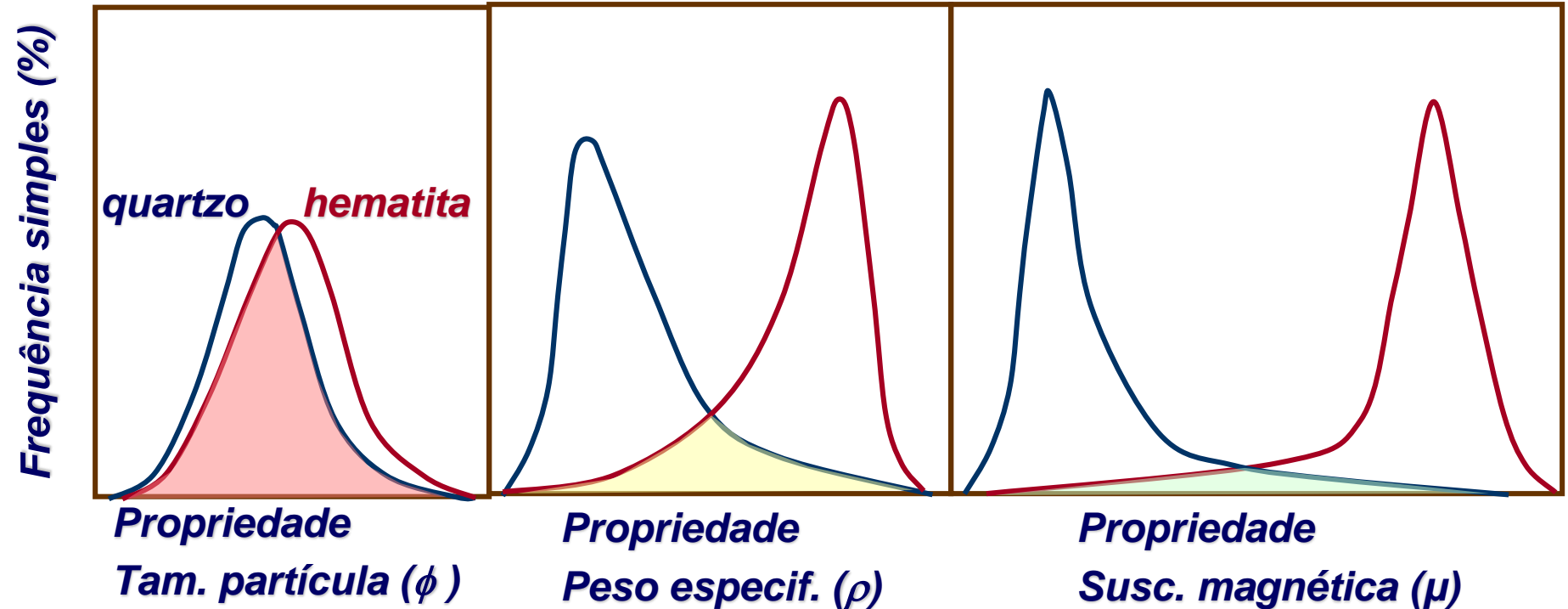
- ***Métodos de determinação:***
  - ***Tamanho de partículas:***
  - ***Peso específico***
  - ***Susceptibilidade magnética***
  - ***Flotabilidade***

# ***CURVAS DE SEPARABILIDADE***



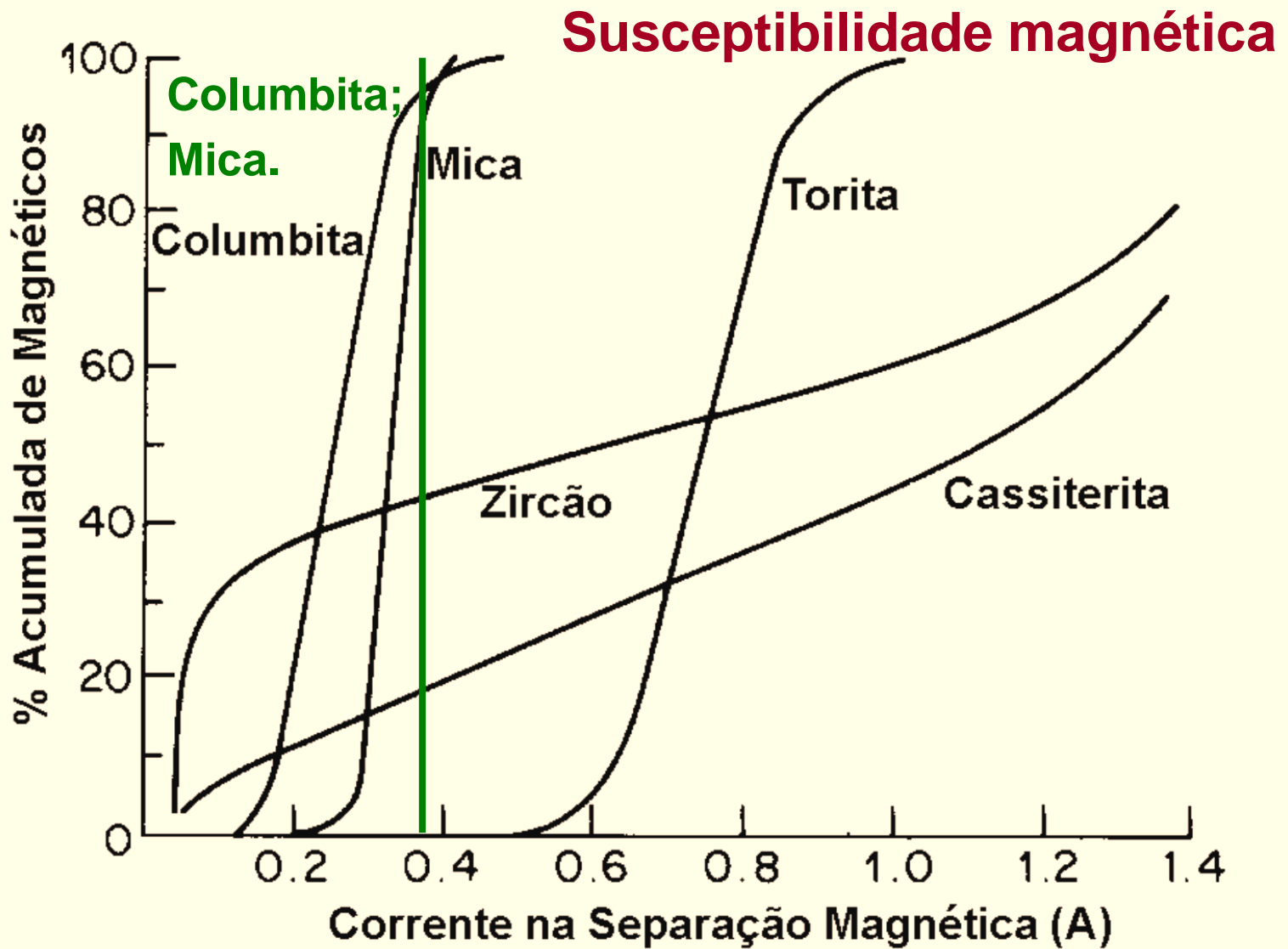
***Agrupar os conjuntos acima por ordem de dificuldade crescente de separação.***

# ***CURVAS DE SEPARABILIDADE***

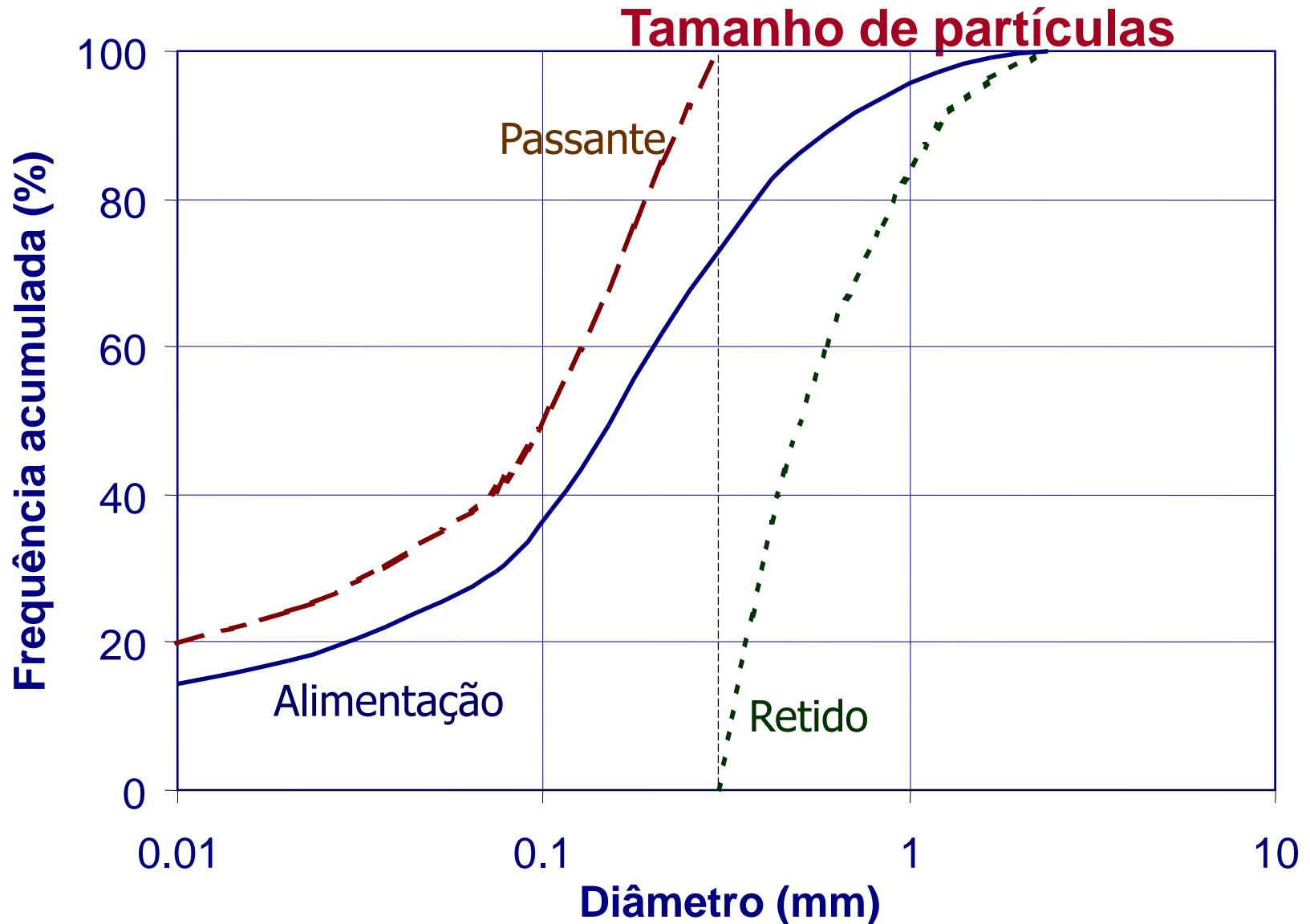


***Qual das propriedades é mais adequada para separação?***

# ***CURVAS DE SEPARABILIDADE***

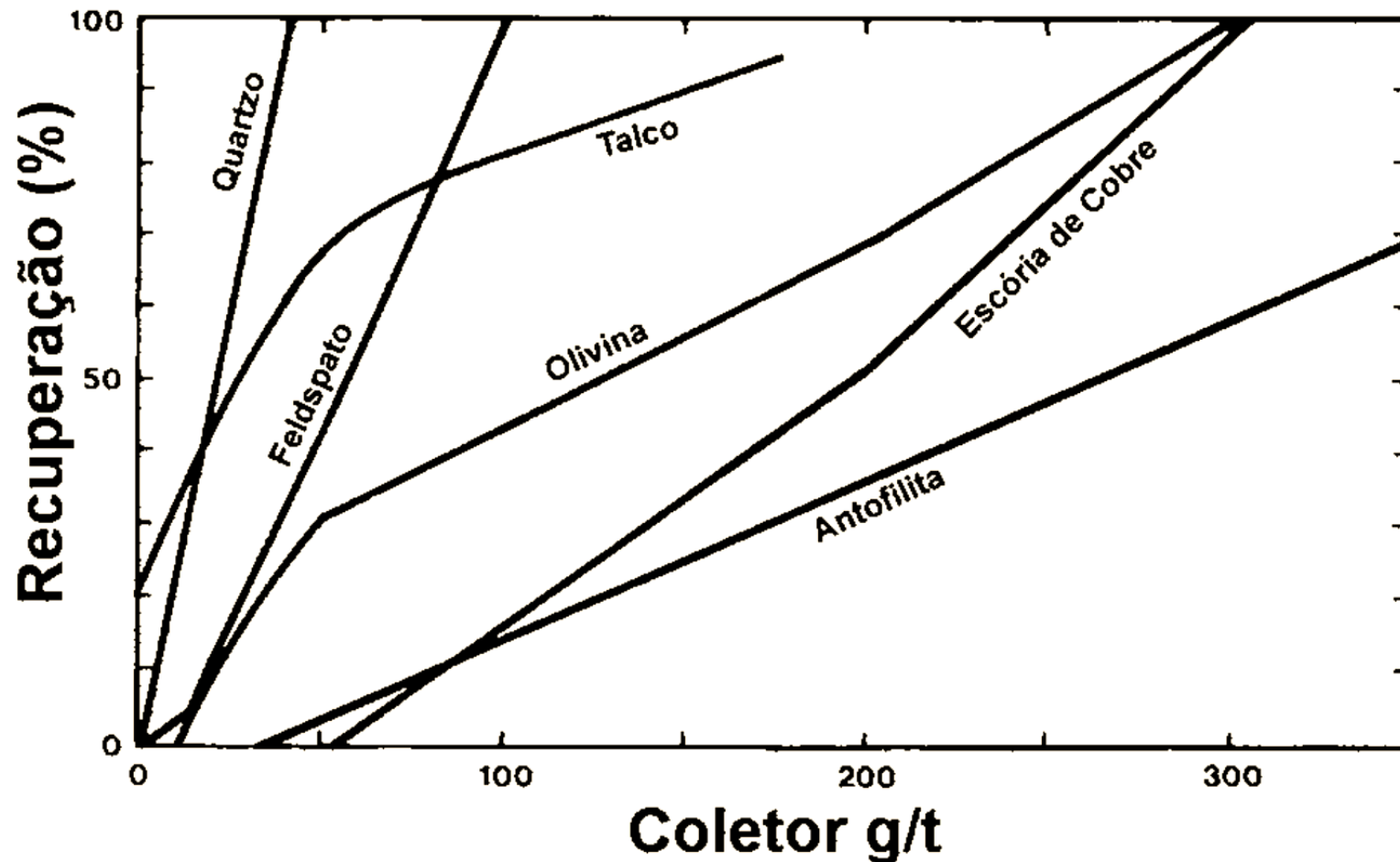


# ***CURVAS DE SEPARABILIDADE***



# ***CURVAS DE SEPARABILIDADE***

## **Flotabilidade**



# ***CURVAS DE SEPARABILIDADE***

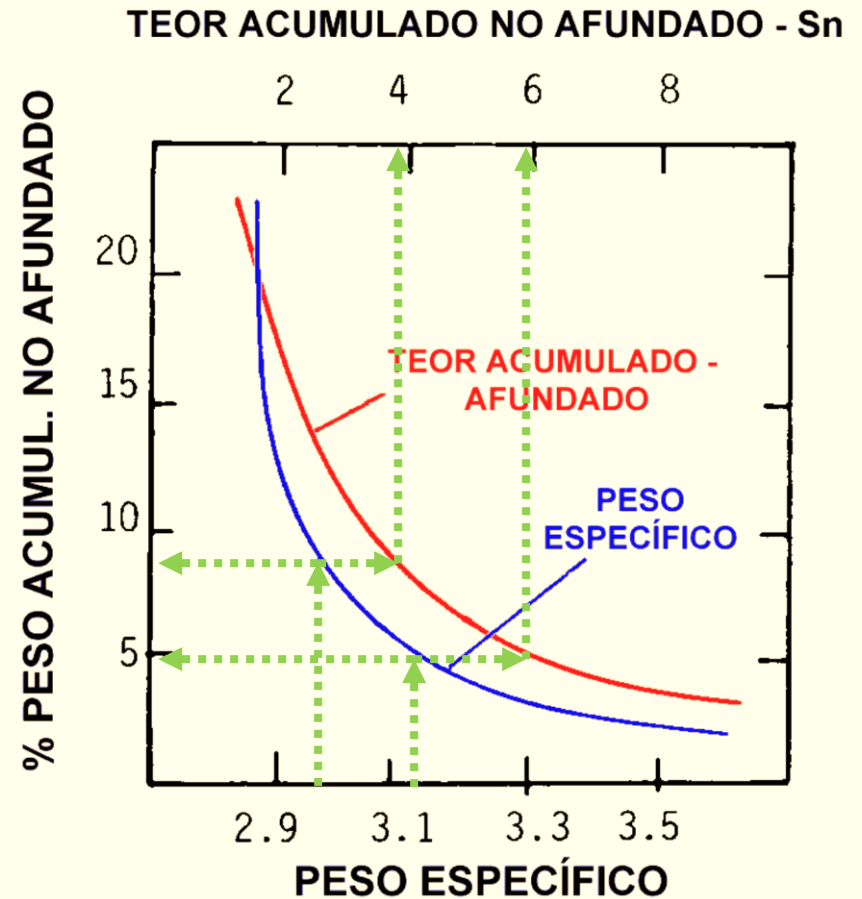
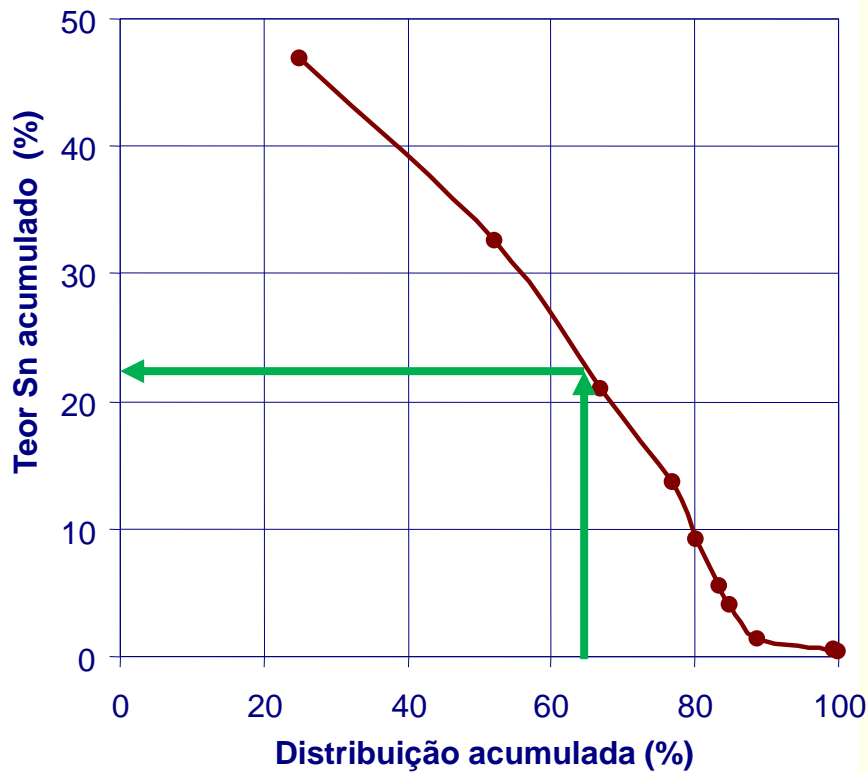
## **Peso específico - minério Sn**

Produto	Produto (%)			Afundado (%)			Flutuado (%)		
	peso	Teor Sn	Distrib. Sn	peso acumul.	Teor Sn	Distrib. Sn	peso acumul.	Teor Sn	Distrib. Sn
d < 2,7	11,1	0,017	0,5						
2,7 < d < 2,8	65,1	0,061	10,6	88,9	0,4	99,5	11,1	0,017	0,5
2,8 < d < 2,9	15,7	0,09	3,8	23,8	1,4	88,9	76,2	0,055	11,1
2,9 < d < 3,0	2,5	0,26	1,7	8,1	3,9	85,1	91,9	0,061	14,9
3,0 < d < 3,2	2,3	0,51	3,1	5,6	5,6	83,4	94,4	0,066	16,6
3,2 < d < 3,4	1,2	1,01	3,2	3,3	9,1	80,2	96,7	0,076	19,8
3,4 < d < 3,8	0,9	4,1	9,9	2,1	13,7	77,0	97,9	0,088	23,0
3,8 < d < 4,2	0,6	9,3	14,9	1,2	20,9	67,1	98,8	0,124	32,9
4,2 < d < 4,6	0,4	25,3	27,1	0,6	32,5	52,2	99,4	0,180	47,8
d > 4,6	0,2	46,9	25,1	0,2	46,9	25,1	99,8	0,281	74,9
<b>Total</b>	<b>100,0</b>	<b>0,374</b>	<b>100,0</b>						



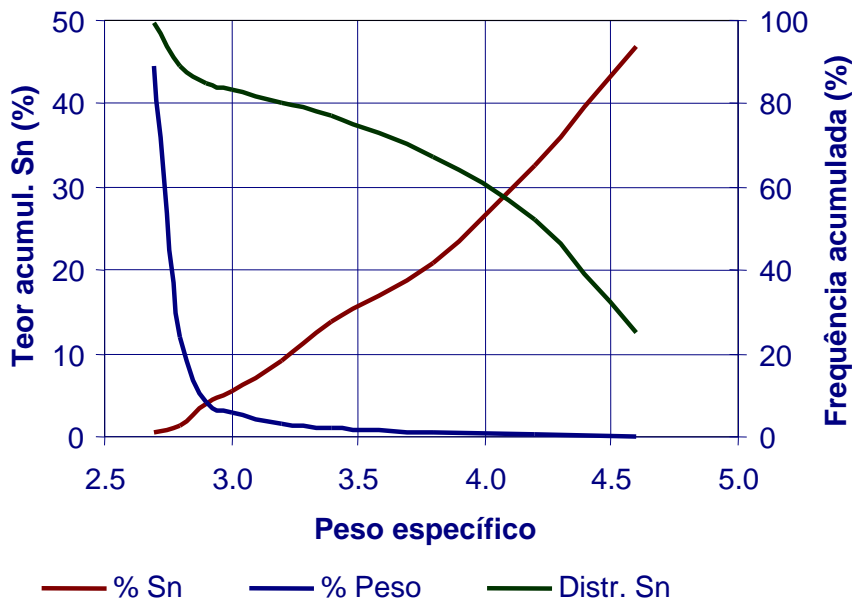
# CURVAS DE SEPARABILIDADE

## Peso específico - minério Sn

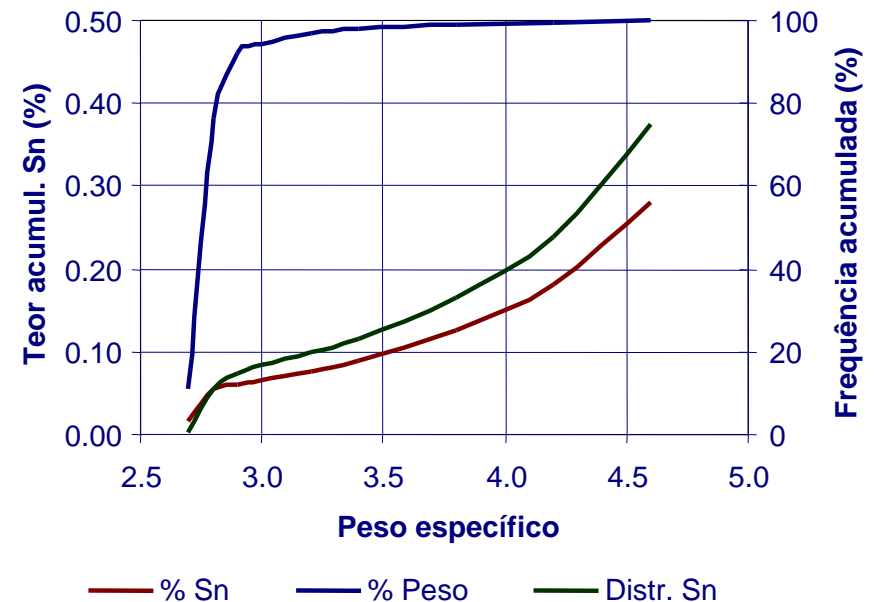


# ***CURVAS DE SEPARABILIDADE***

## **Peso específico - minério Sn**



**Afundado**

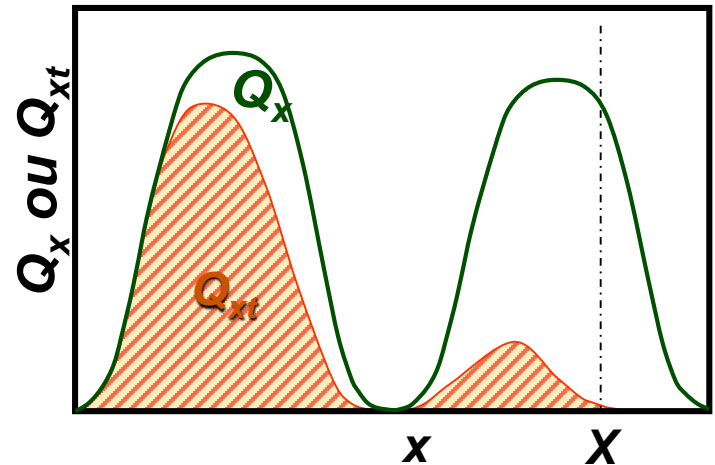


**Flutuado**

# ***CURVAS DE DESEMPENHO***

- **Forma de avaliar a eficácia e eficiência da separação**
- **Cinética – a taxa de separação:**

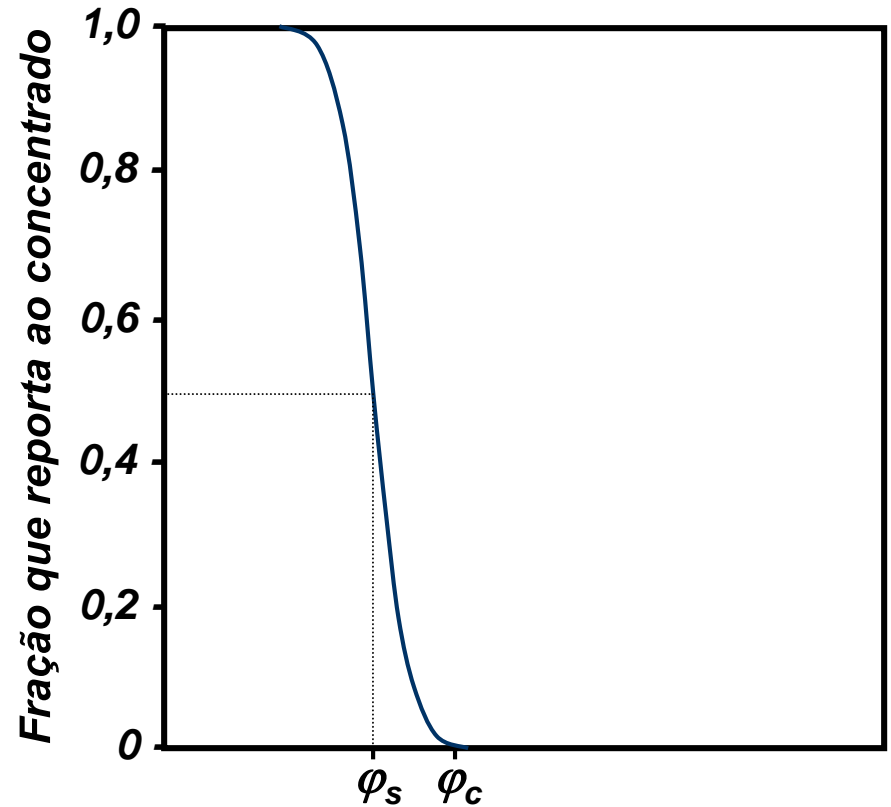
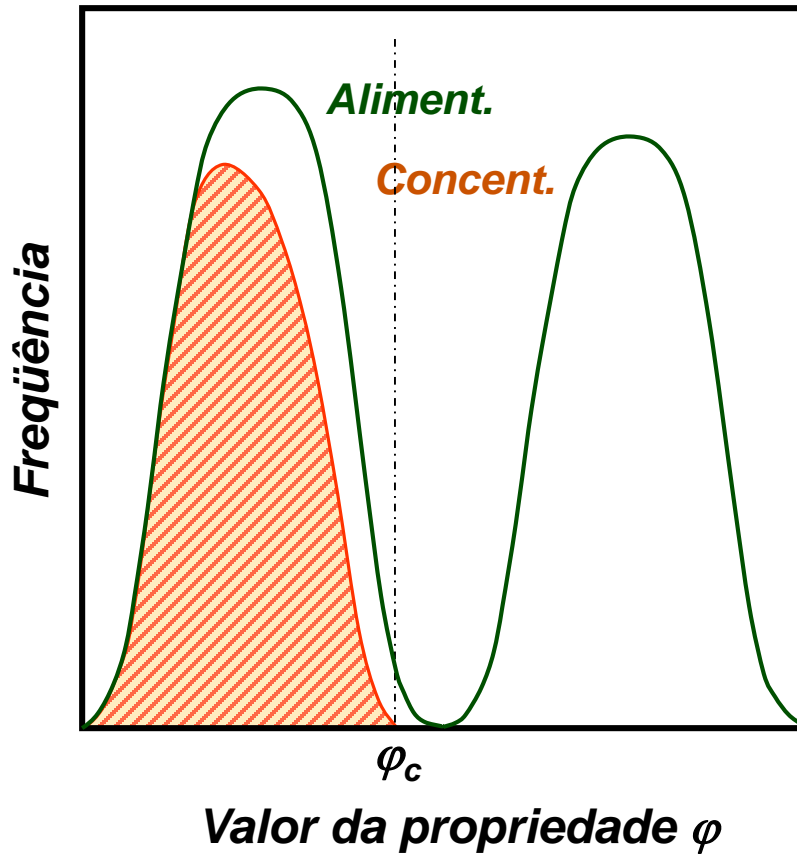
$$\frac{dQ_{xt}}{dt} = k \cdot f(X-x) \cdot g(Q_x - Q_{xt})$$



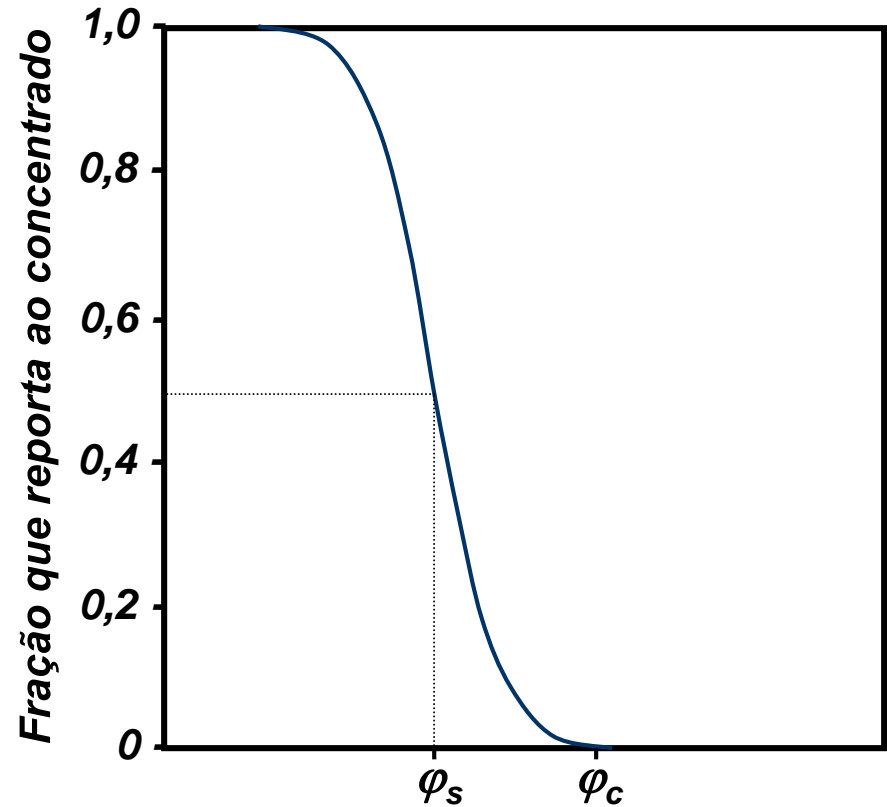
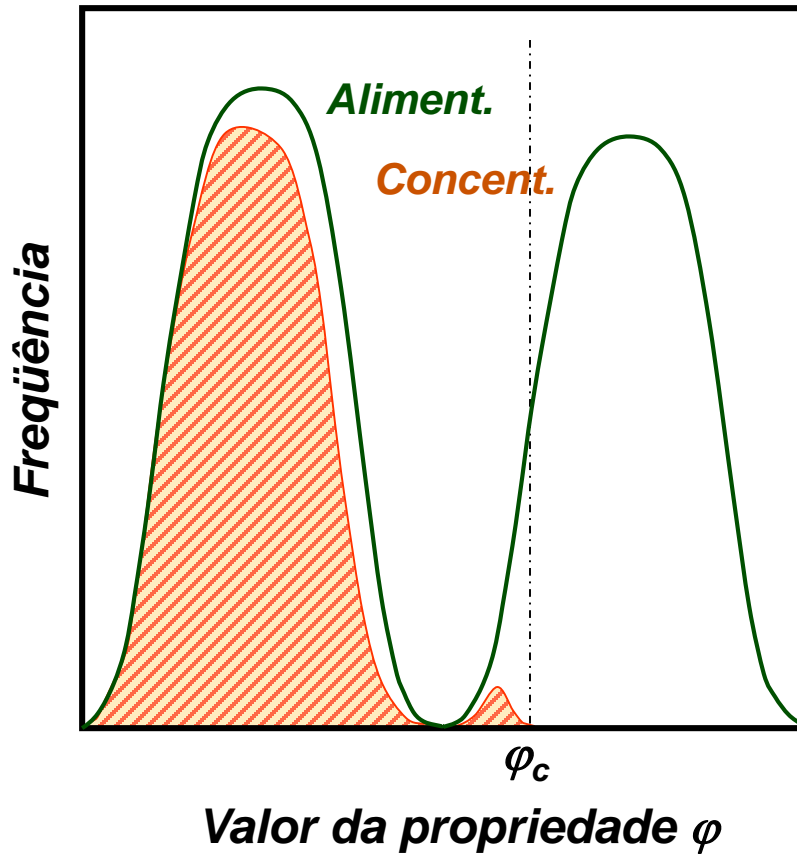
K é uma constante que depende das características do material, equipamento e condições operacionais

F e g são funções relacionadas unicamente ao equipamento e condições operacionais – INDEPENDEM DAS CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL

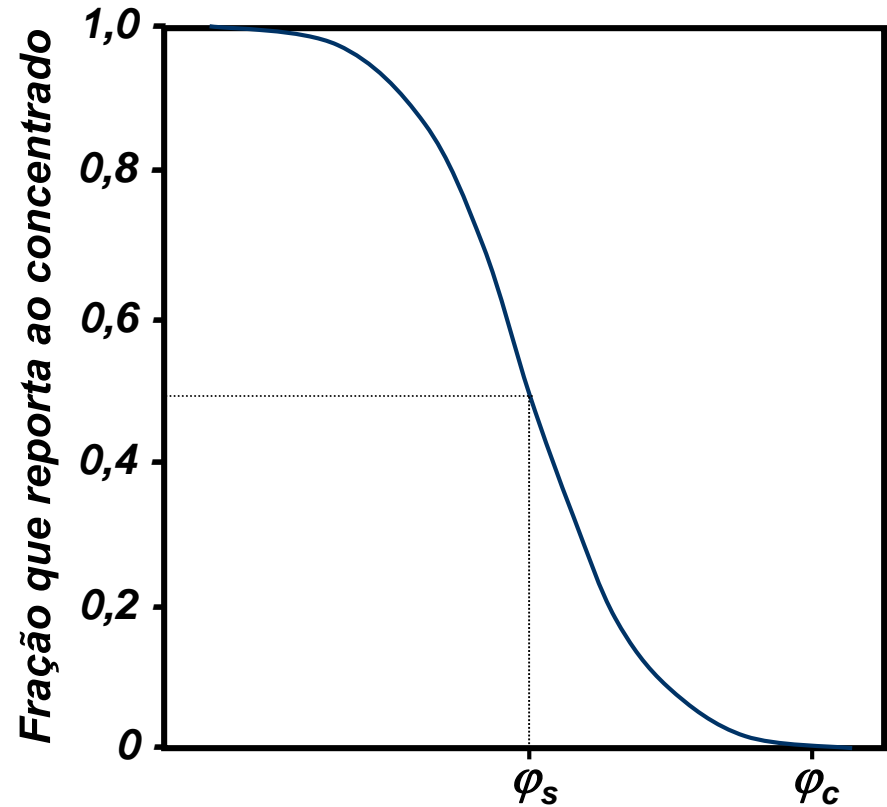
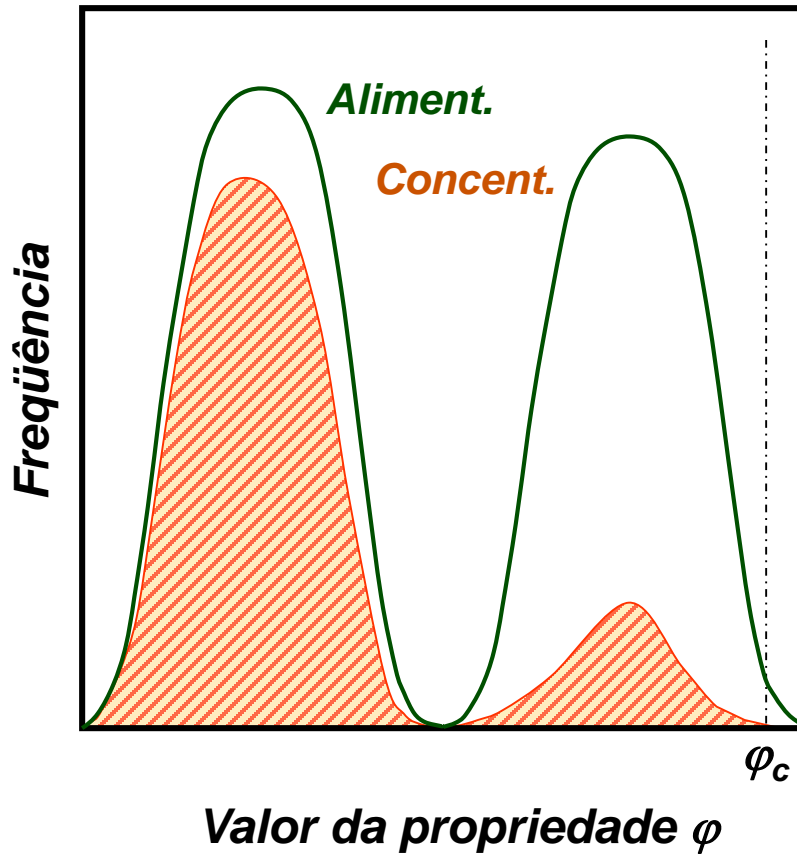
# ***CURVA DE DESEMPENHO***



# ***CURVA DE DESEMPENHO***

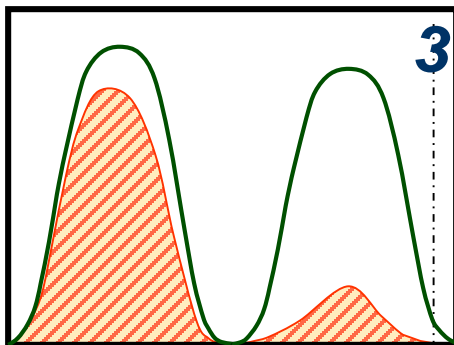
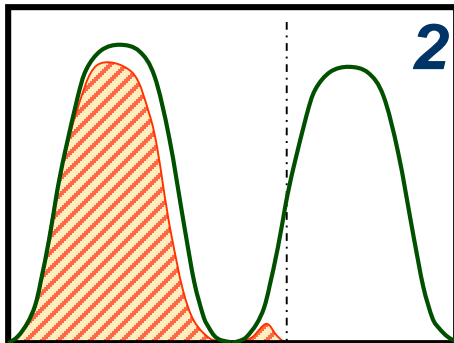
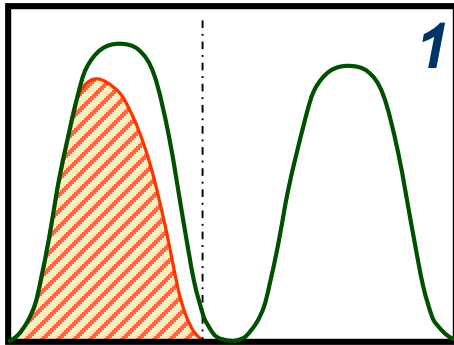


# ***CURVA DE DESEMPENHO***

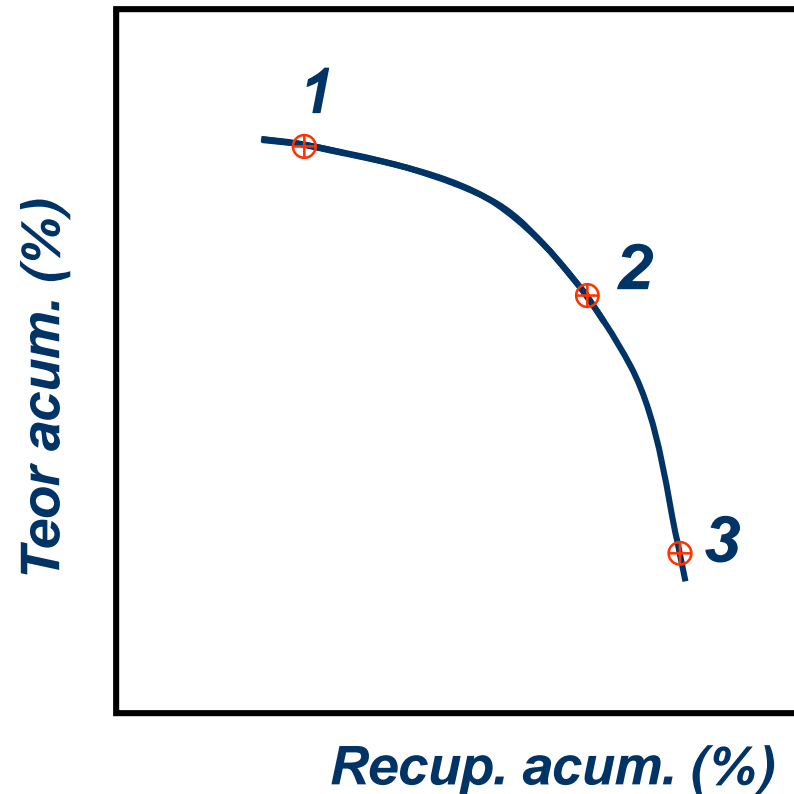


*Aliment.*

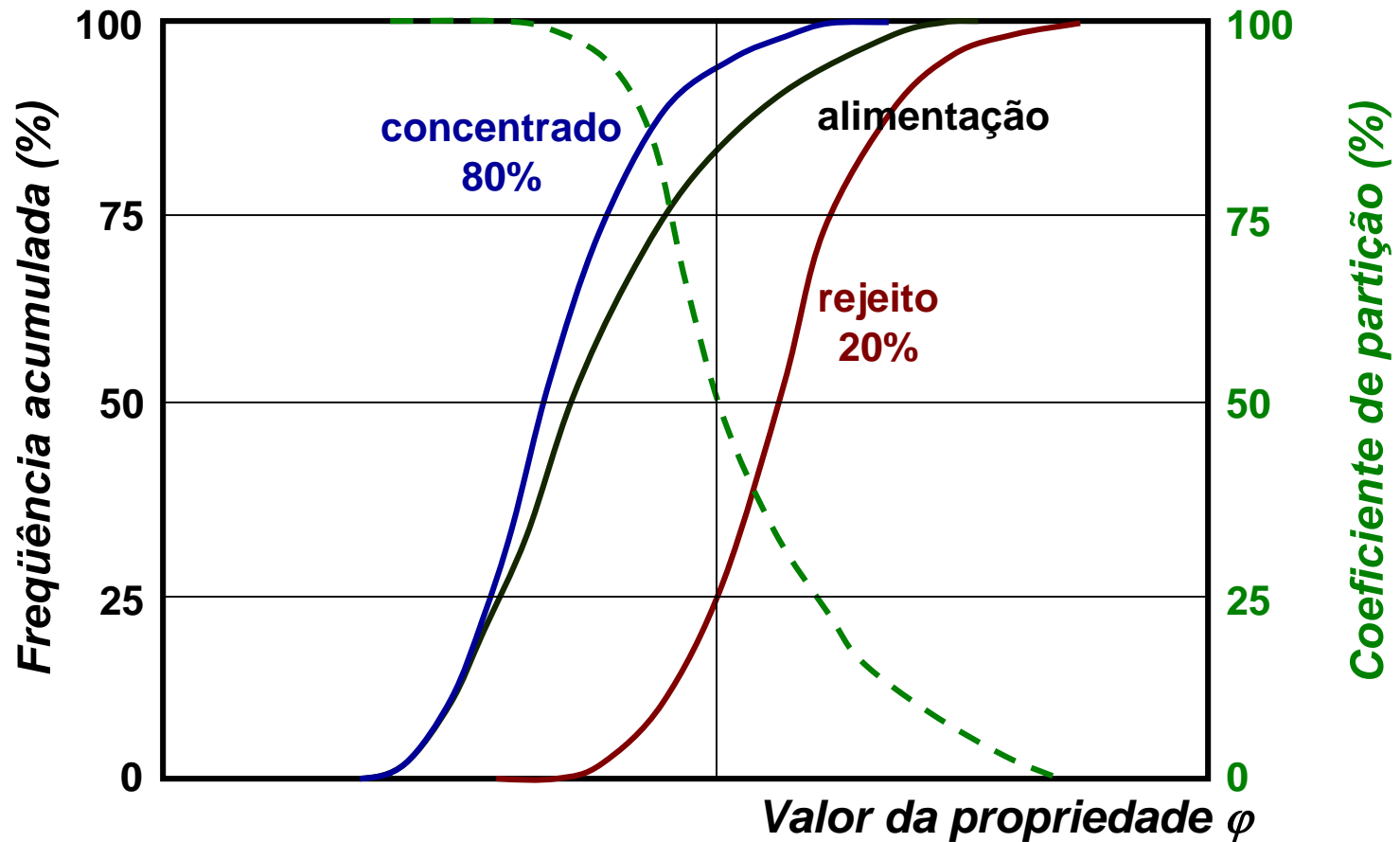
*Concent.*



# ***CURVA DE TEOR X RECUPERAÇÃO***



# ***CURVA DE DESEMPENHO***

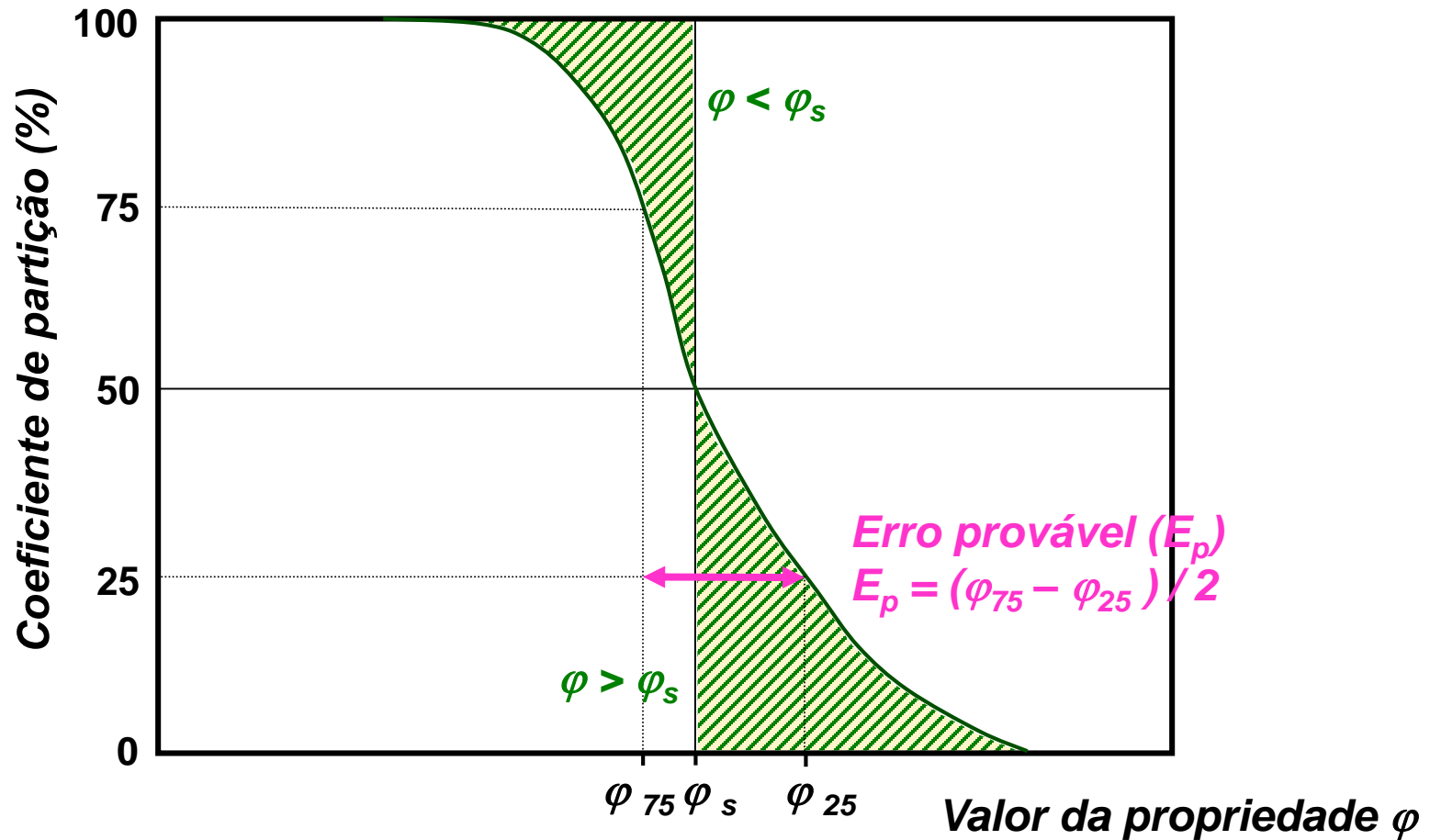


Denominadas também : Curva de Tromp, partição, distribuição, eficiência, desempenho



# CURVA DE DESEMPENHO

## Curva de Tromp



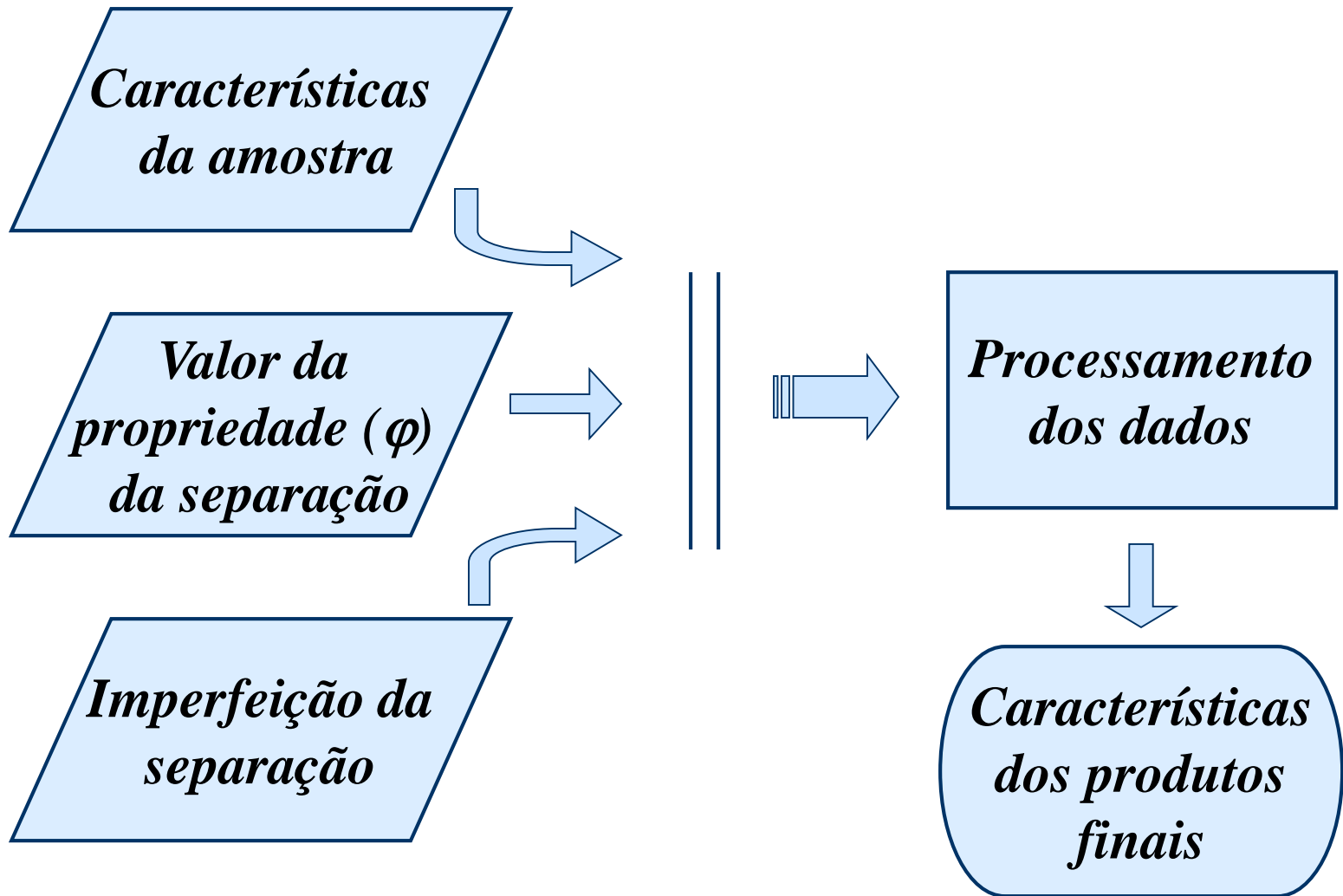
Curva de partição reduzida – todos os valores são divididos pelo  $\varphi_{50}$   
(adimensional em relação à propriedade considerada)

# ***CURVA DE DESEMPENHO***

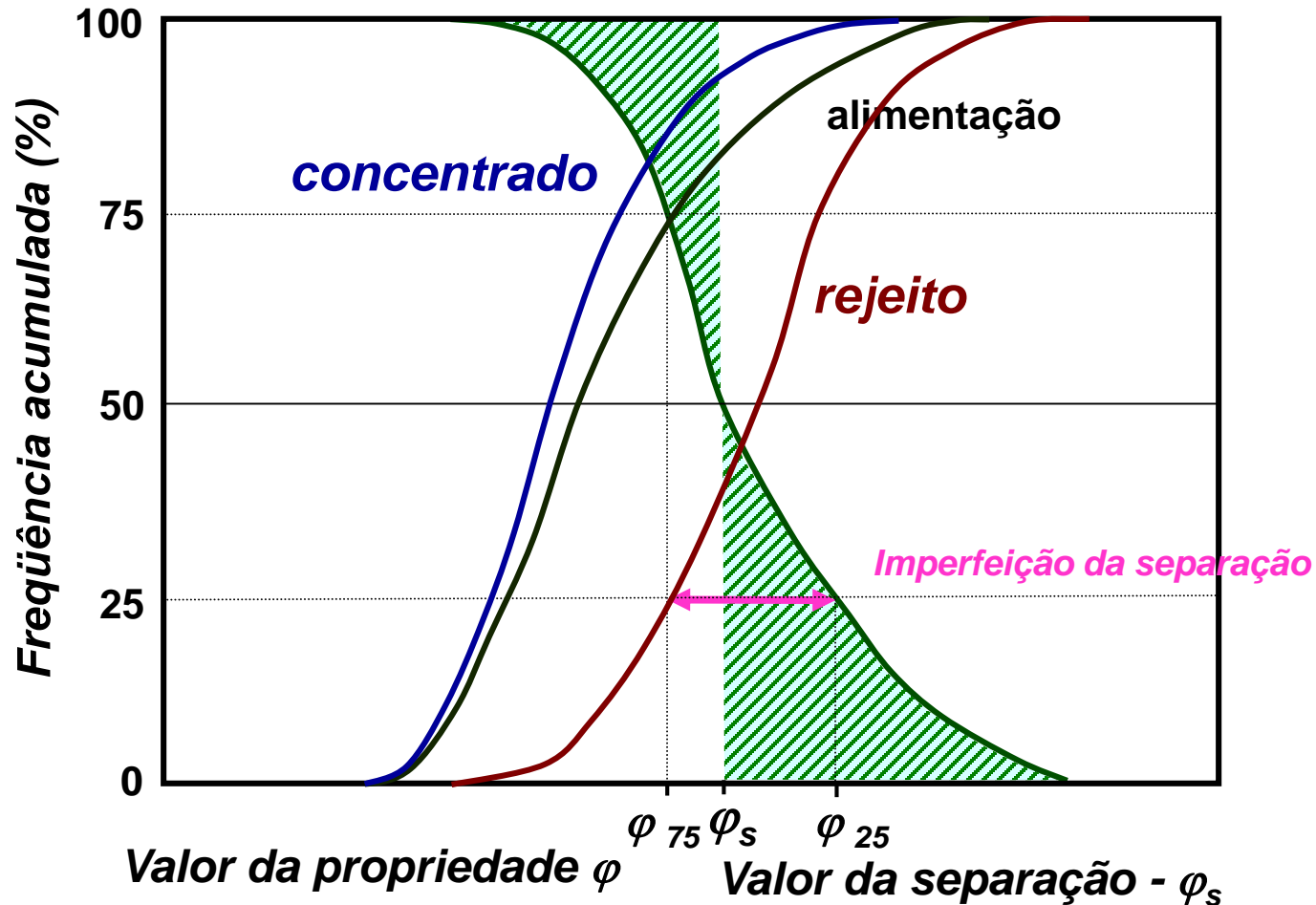
## □ **Imperfeição da separação**

- ***Fatores intrínsecos da amostra***
- ***Natureza do processo de separação***
- ***Características construtivas do equipamento de separação***
- ***Condições operacionais***

# ***SIMULAÇÃO DE UMA SEPARAÇÃO***

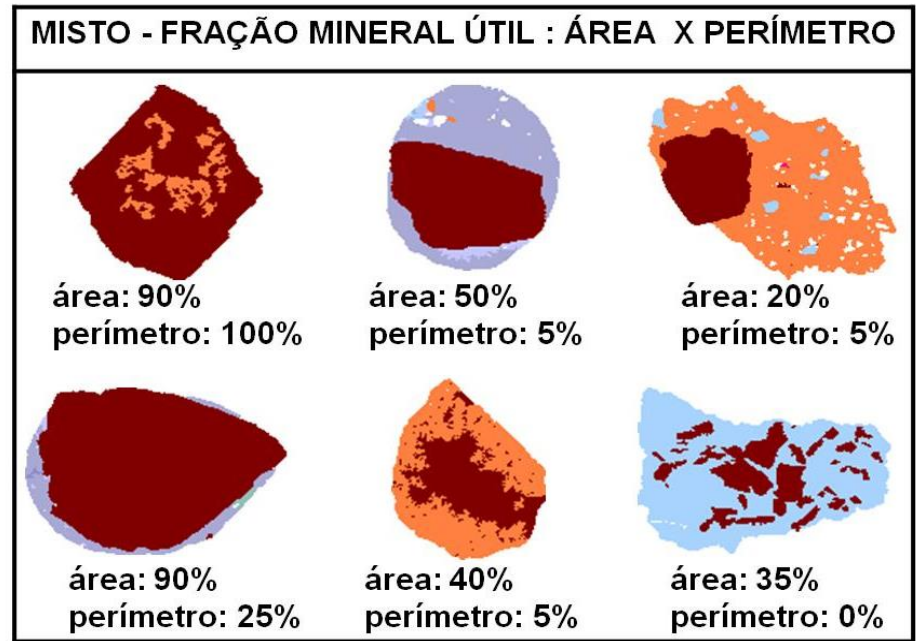
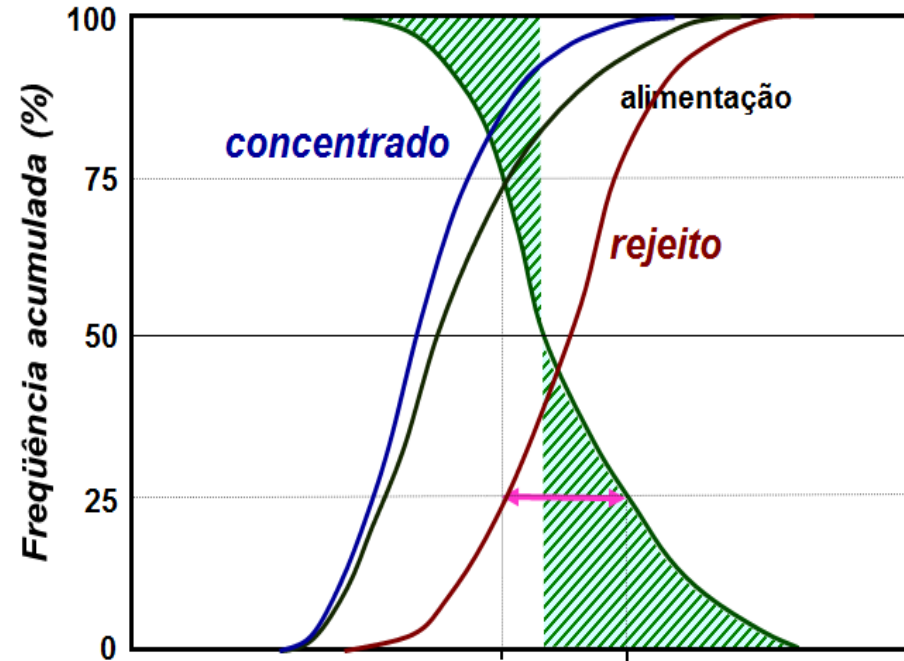


# ***SIMULAÇÃO DE UM PROCESSO DE SEPARAÇÃO***

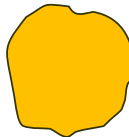


*Curva de separabilidade*

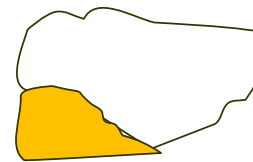
# CURVAS DE SEPARABILIDADE CURVAS DE LIBERAÇÃO



grão de galena



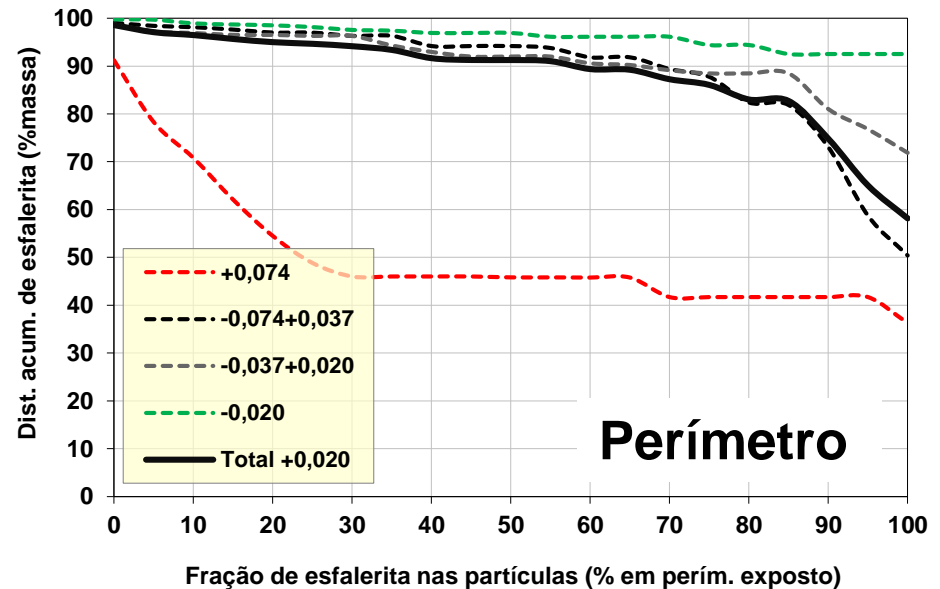
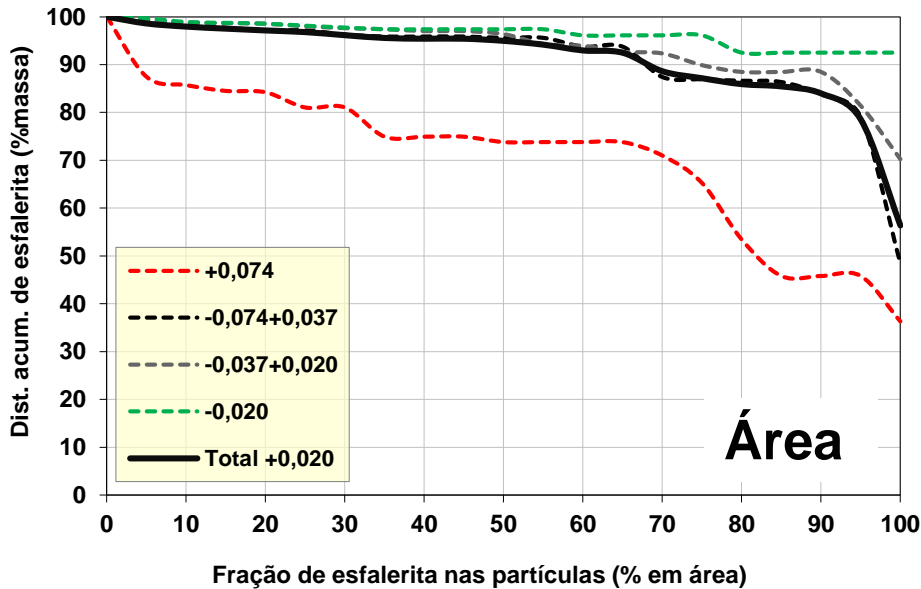
grão de pirita



partícula mista de  
galena e pirita

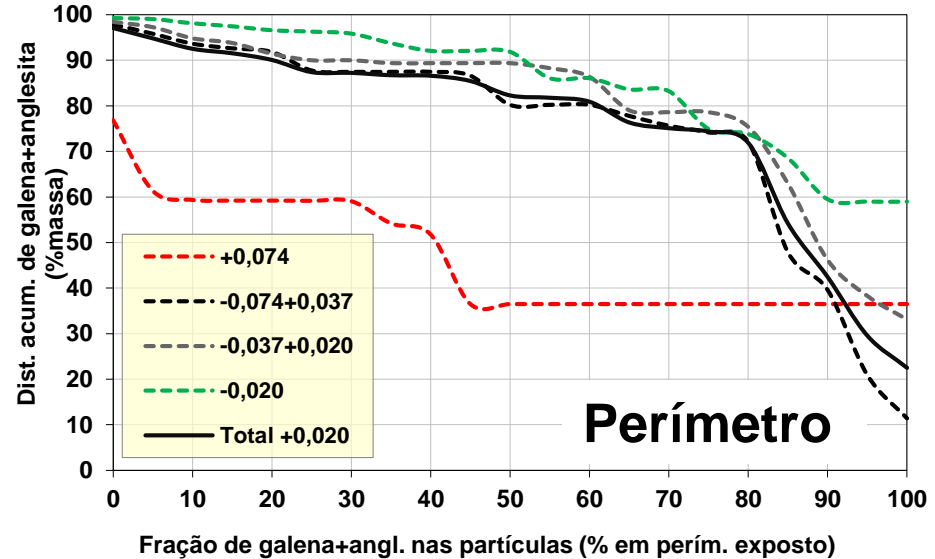
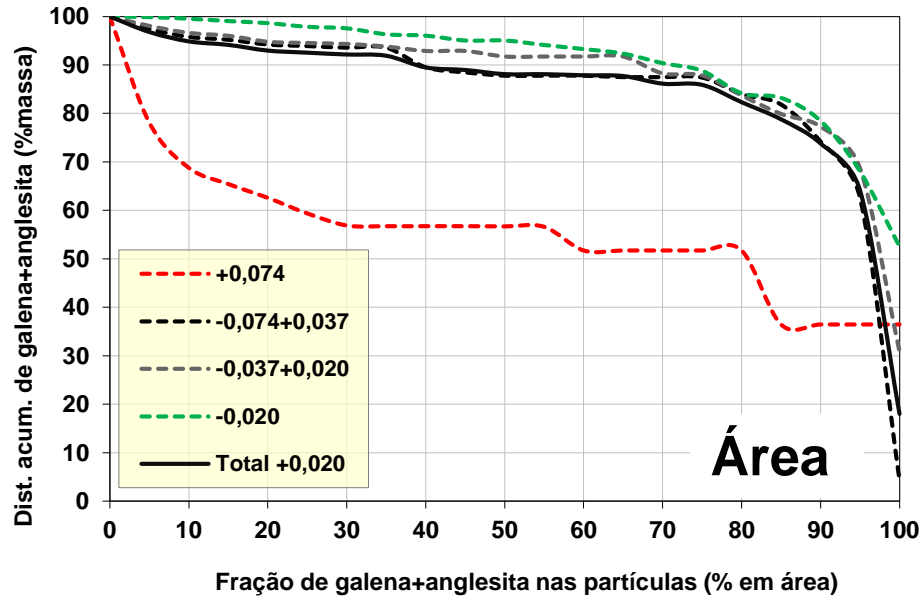
(Jones, 1987)

# CURVAS DE LIBERAÇÃO



Fração de <b>mineral A</b> na partícula	área ou perímetro (%)			
	≥ 85	≥ 90	≥ 95	100
Grau de liberação em área (%)	85	84	79	56
Grau de liberação em perímetro exposto (%)	83	75	65	58

# CURVAS DE LIBERAÇÃO



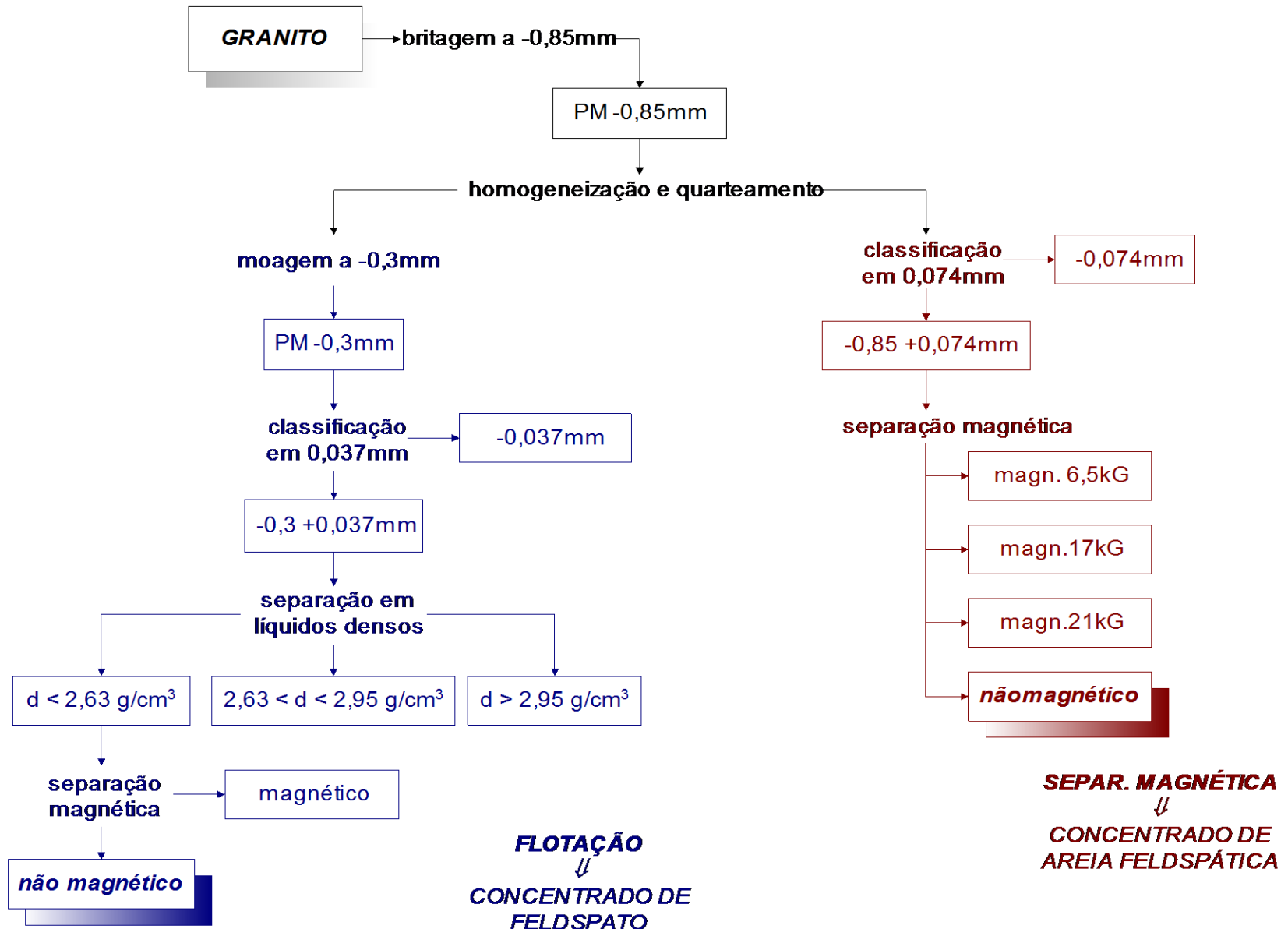
Fração de <b>mineral B</b> na partícula	área ou perímetro (%)			
	≥ 85	≥ 90	≥ 95	100
Grau de liberação em área (%)	79	74	64	20
Grau de liberação em perímetro exposto (%)	54	42	30	22

# ***EXEMPLOS DE APLICAÇÕES***

- ***CARACTERIZAÇÃO DE GRANITO***
  - ***UTILIZAÇÃO NA INDÚSTRIA VIDREIRA:***
    - **Qualidade do produto final?**
    - **Qual o(s) processo(s) de concentração?**
    - **Estimativas de recuperação?**
  
  - ***ESTUDOS DE SEPARABILIDADE DIRIGIDOS A:***
    - **Avaliação de separação magnética**
    - **Avaliação de concentração por flotação**
    - **Qualidade dos produtos e estimativa de recuperações**



# CARACTERIZAÇÃO DE GRANITO



# ***CARACTERIZAÇÃO DE GRANITO***

## ***- DIRIGIDA À FLOTAÇÃO -***

FRAÇÃO / PRODUTO	% em massa	TEORES (%)											DISTRIBUIÇÃO (%)						
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	
<b>Conc. Feldspato</b>	<b>51,5</b>	<b>71,2</b>	<b>16,6</b>	<b>0,12</b>	<b>0,02</b>	<b>4,26</b>	<b>7,25</b>	<b>0,62</b>	<b>&lt;0,10</b>	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>	<b>49,2</b>	<b>62,7</b>	<b>5,9</b>	<b>6,0</b>	<b>63,1</b>	<b>70,1</b>	<b>47,0</b>	
Flut. magnético	1,9	70,9	15,8	0,85	0,03	4,20	7,08	0,71	<0,10	0,04	0,12	1,8	2,2	1,5	0,3	2,3	2,5	2,0	
Intermediário	21,4	91,1	4,78	0,42	0,07	1,43	0,63	0,39	<0,10	0,06	0,03	26,1	7,5	8,6	8,3	8,8	2,5	12,2	
Afundado	1,7	34,9	11,2	30,4	5,60	1,21	1,97	4,95	1,91	0,43	2,17	0,8	1,4	50,4	56,2	0,6	0,6	12,6	
-0,020mm	23,5	70,3	15,2	1,49	0,22	3,74	5,50	0,76	0,30	0,11	0,10	22,1	26,2	33,5	29,3	25,3	24,2	26,2	
Total	100,0	75,5	13,3	0,95	0,16	3,42	5,29	0,66	<0,10	0,06	0,07	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

❑ **Características do produto:**

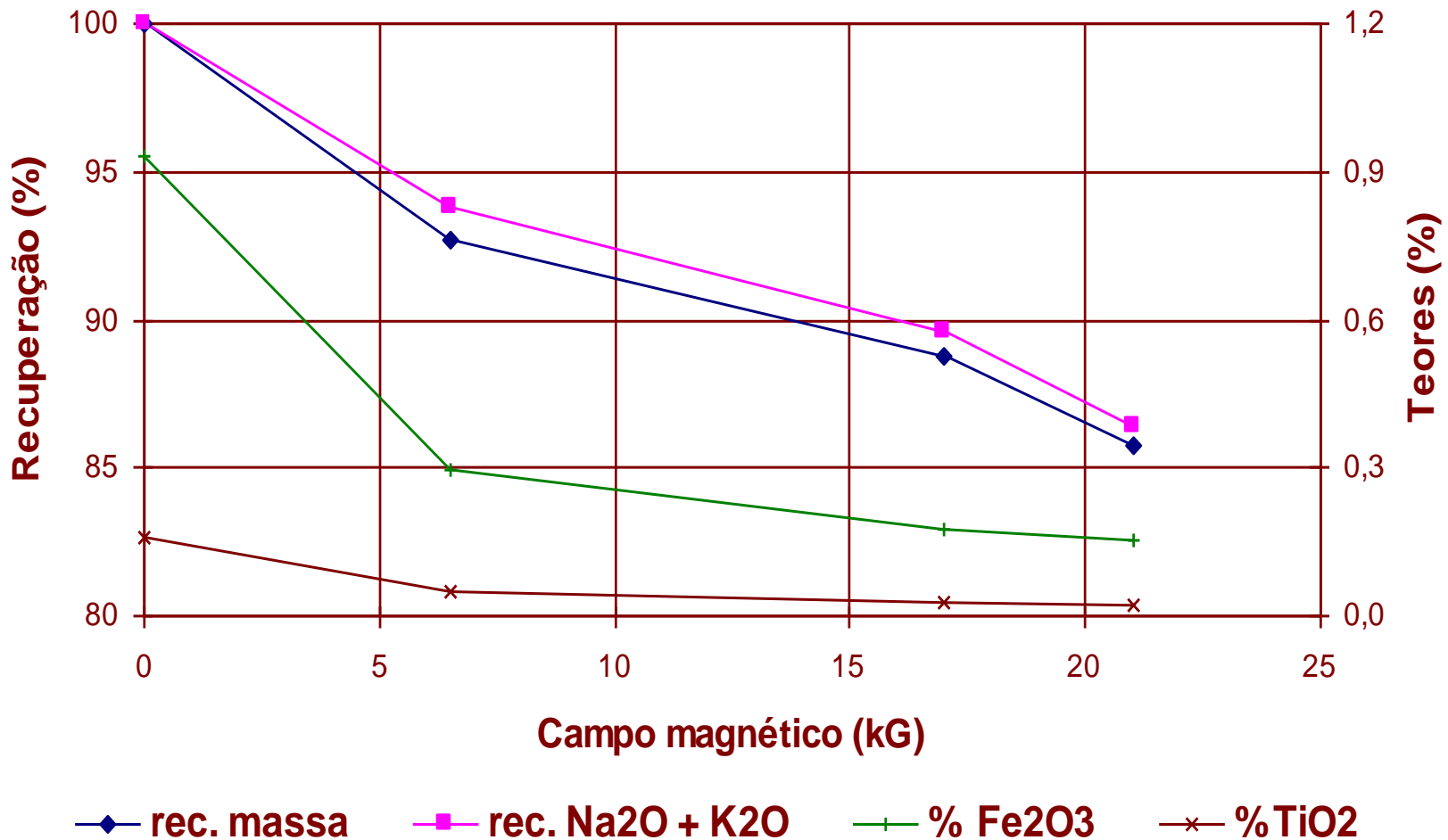
❑ 11,5% Na<sub>2</sub>O+ K<sub>2</sub>O; 16,6% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,12% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 0,02% TiO<sub>2</sub>

❑ **Estimativas de recuperações máximas:**

❑ 51% em massa e 67% de feldspatos

# ***CARACTERIZAÇÃO DE GRANITO***

## ***CURVA DE SEPARABILIDADE MAGNÉTICA***



# ***CARACTERIZAÇÃO DE GRANITO***

## ***- DIRIGIDA À SEPARAÇÃO MAGNÉTICA -***

FRAÇÃO / PRODUTO	% em massa	TEORES (%)										DISTRIBUIÇÃO (%)						
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO
<b>Conc. areia feld.</b>	<b>77,1</b>	<b>77,1</b>	<b>12,7</b>	<b>0,15</b>	<b>0,02</b>	<b>3,25</b>	<b>4,96</b>	<b>0,46</b>	<b>&lt;0,10</b>	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>	<b>79,3</b>	<b>73,8</b>	<b>11,6</b>	<b>9,2</b>	<b>76,4</b>	<b>76,7</b>	<b>55,4</b>
Magnet. 21kG	2,7	76,8	13,5	0,90	0,17	3,50	5,06	0,82	0,20	0,05	0,09	2,8	2,7	2,4	2,7	2,9	2,7	3,4
Magnet. 17kG	3,5	65,1	15,4	3,00	0,60	3,73	5,21	1,16	0,51	0,07	0,34	3,0	4,1	10,4	12,5	4,0	3,7	6,3
Magnet. 6,5kG	6,6	58,0	17,1	8,92	1,52	2,96	3,90	1,95	0,83	0,10	0,62	5,1	8,5	58,5	59,7	5,9	5,2	20,0
-0,074mm	10,1	72,6	14,3	1,70	0,26	3,51	5,82	0,95	0,21	0,09	0,13	9,8	10,9	17,1	15,9	10,8	11,8	14,9
Total	100,0	75,0	13,3	1,01	0,17	3,28	4,99	0,64	0,10	0,05	0,08	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

□ **Características do produto:**

□ 8,2% Na<sub>2</sub>O+ K<sub>2</sub>O; 12,7%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,15% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 0,02% TiO<sub>2</sub>;

□ **Estimativas de recuperações:**

□ 77% em massa e 77% de feldspatos

# ***CARACTERIZAÇÃO DE GRANITO***

## ***- SUMÁRIO -***

### ***□ FLOTAÇÃO → concentrado de feldspato***

<b>Na<sub>2</sub>O+ K<sub>2</sub>O</b>	<b>Teores (%)</b>			<b>Recuperações (%)</b>	
	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>em massa</b>	<b>feldspatos</b>
11,5	16,6	0,12	0,02	51%	67%

### ***□ SEPARAÇÃO MAGNÉTICA → concentrado de areia feldspática***

<b>Na<sub>2</sub>O+ K<sub>2</sub>O</b>	<b>Teores (%)</b>			<b>Recuperações (%)</b>	
	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>em massa</b>	<b>feldspatos</b>
8,2	12,7	0,15	0,02	77%	77%

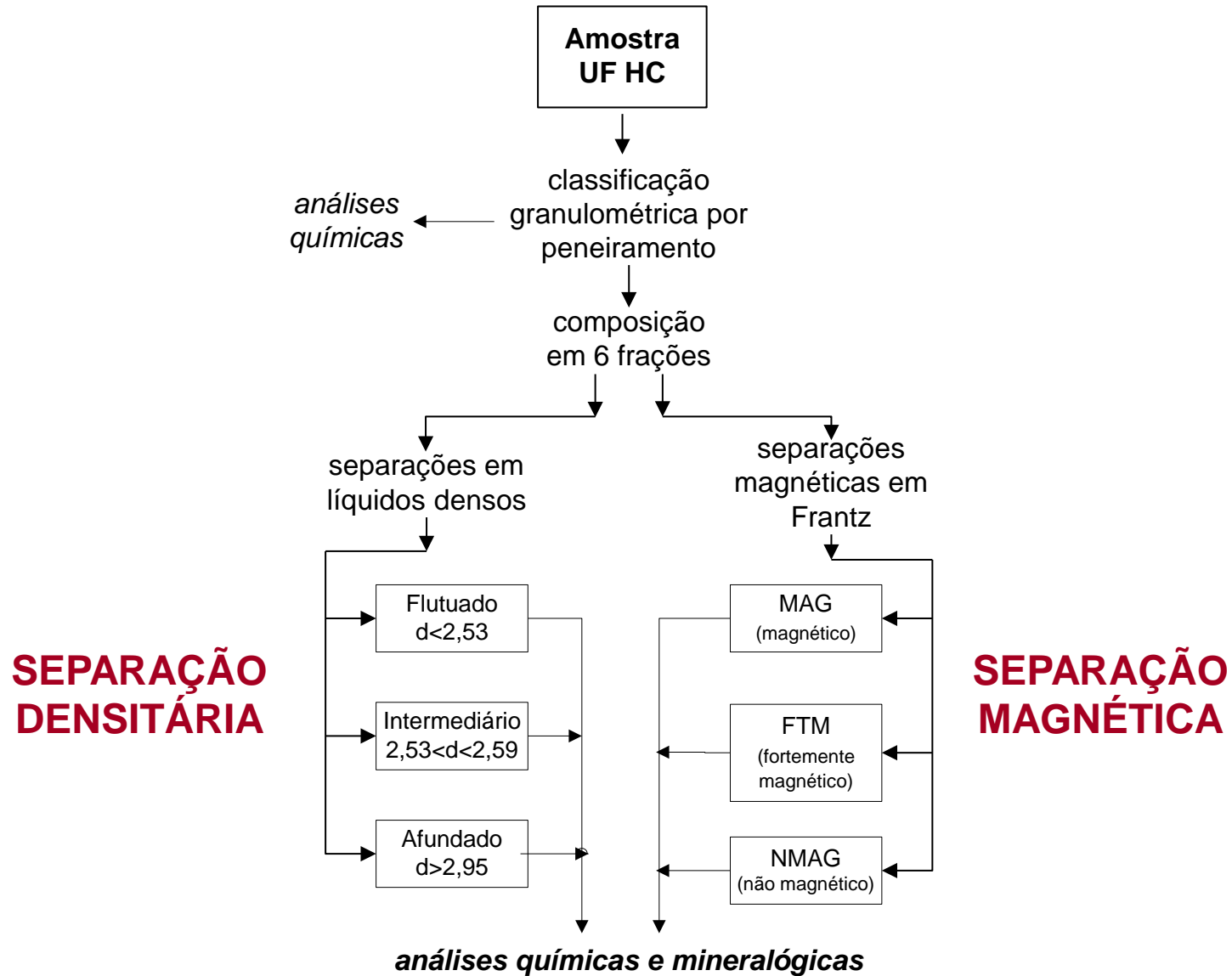
# ***EXEMPLOS DE APLICAÇÕES***

## **□ *CARACTERIZAÇÃO DE BAUXITA COM ALTO TEOR DE FERRO***

### **□ *ESTUDOS DIRIGIDOS A:***

- *Avaliar a(s) forma(s) de ocorrência do ferro e possibilidades de minimizar esta impureza***
- *Indicar alternativas de beneficiamento para minimizar os teores de ferro***
- *Características dos produtos passíveis de serem obtidos e estimativa de recuperações***

# BAUXITA COM ALTO TEOR DE FERRO



# BAUXITA COM ALTO TEOR DE FERRO

## Análise granulométrica:

Fração (Tyler)	Abertura (mm)	% Massa		Teores (%)						Distribuição (%)		
		retido	acum.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> apr.	SiO <sub>2</sub> reat.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> apr.
+10	1,680	5,3	5,3	44,0	20,3	8,72	1,82	45,4	2,81	5,0	5,4	5,8
-10 +14	1,190	7,5	12,7	49,4	17,0	6,99	1,19	44,4	2,81	8,0	6,3	8,0
-14 +20	0,841	11,5	24,2	48,4	17,2	8,00	1,14	44,0	2,74	12,0	9,9	12,2
-20 +28	0,595	9,9	34,1	48,3	17,0	8,68	1,12	44,5	2,85	10,3	8,4	10,6
-28 +35	0,420	11,1	45,1	49,1	16,3	8,55	1,08	44,1	2,95	11,7	9,0	11,8
-35 +48	0,297	13,7	58,8	49,4	16,9	7,65	1,05	45,1	2,89	14,6	11,6	15,0
-48 +65	0,210	10,8	69,7	48,4	18,7	5,83	1,05	45,0	2,60	11,3	10,1	11,8
-65 +100	0,149	9,4	79,1	48,4	20,4	4,25	1,24	45,0	2,13	9,8	9,6	10,3
-100 +150	0,105	6,3	85,4	45,9	23,4	3,05	1,68	43,9	1,60	6,3	7,4	6,7
-150 +200	0,074	2,4	87,8	43,5	27,7	2,83	2,04	40,3	2,01	2,3	3,3	2,4
-200 +400	0,044	2,7	90,5	41,9	28,6	3,10	1,79	38,2	1,88	2,4	3,8	2,5
-400 under	0,010	3,9	94,4	33,1	32,7	13,3	2,93	19,1	9,09	2,8	6,4	1,8
-400 over		5,6	100,0	29,1	31,1	22,0	4,24	7,79	19,5	3,5	8,7	1,1
<b>Total</b>		<b>100,0</b>		<b>46,3</b>	<b>20,0</b>	<b>7,88</b>	<b>1,48</b>	<b>41,3</b>	<b>3,81</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

## Composição mineralógica:

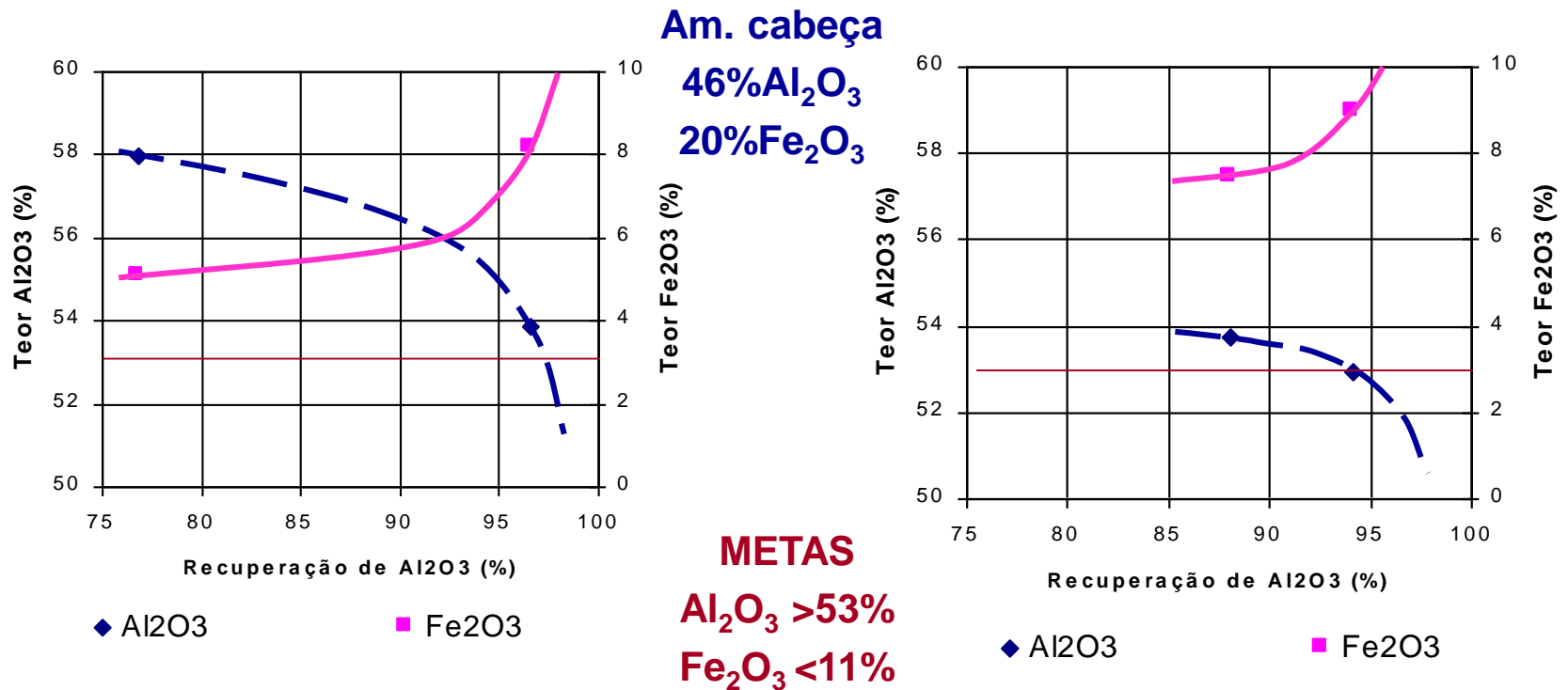
gibbsita	oxi-hidroxi- de ferro	quartzo	caulinita	anatásio	outros
63	23	4	8	2	< 1

oxi-hidroxi.de ferro: goethita, hematita , com lepidocrocita subordinada



# BAUXITA COM ALTO TEOR DE FERRO

Espectros de recuperação de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  versus teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  para as separações densitária e magnética

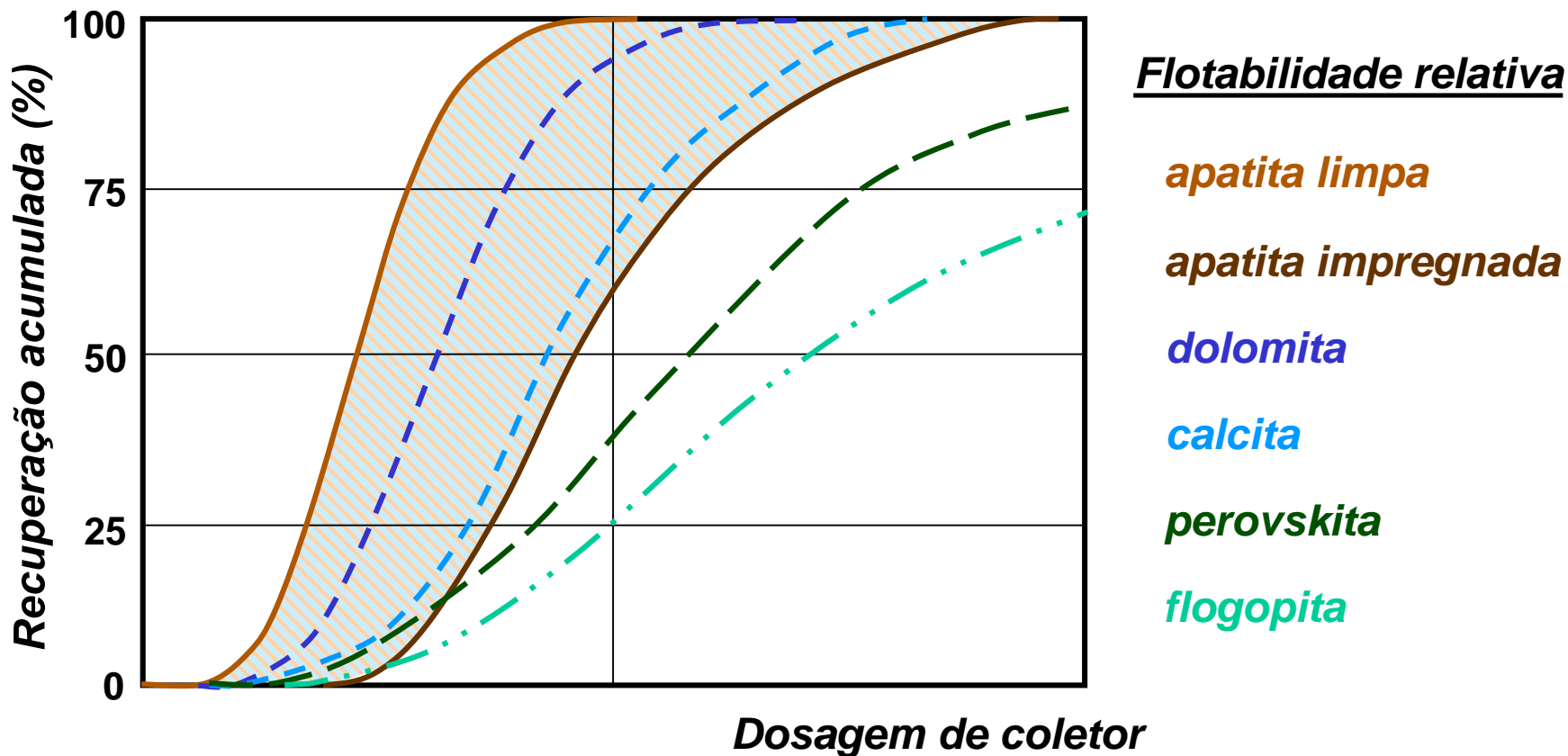


**SEPARAÇÃO DENSITÁRIA**

**SEPARAÇÃO MAGNÉTICA**

# OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE LAVRA DE MINÉRIO DE FOSFATO (CMT)

## Características de separabilidade dos principais minerais



# ***OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE LAVRA DE MINÉRIO DE FOSFATO (CMT)***

- ***Ensaio padrão de caracterização:***
  - Objetivo → auxiliar no planejamento de lavra
  - Amostras → furos de sondagem a percussão (“acesso limitado e concomitante ao avanço da lavra”)
  - Preparação de amostra em planta piloto: 25 a 35 kg
  - Ensaio padrão de flotação (2 a 3 testes) definindo resultados de desempenho para concentrado com 35,5% de  $P_2O_5$
  - Inserção dos resultados no sistema de planejamento de lavra → ***avaliação***

# ***ANÁLISE DOS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO - APLICAÇÕES***

- ❑ ***Previsão de facilidade / dificuldade da separação***
- ❑ ***Sugestão / seleção do(s) método(s) de concentração a ser(em) empregado(s)***
- ❑ ***Previsão de qualidade do produto final***
- ❑ ***Estimativas de recuperação***
- ❑ ***Otimização de processos de separação***
- ❑ ***Otimização do planejamento de lavra***
- ❑ ***Simulação de processos de concentração***