

PMI3101 - INTRODUÇÃO À ENGENHARIA APLICADA À INDÚSTRIA MINERAL

Beneficiamento mineral: Aplicações e conceitos básicos

São Paulo – 29 de fevereiro de 2016

Professor Mauricio Guimarães Bergerman

Noções básicas

- **Ler Capítulo 1 do livro:**
- Teoria e prática do Tratamento de Minérios: Bombeamento de polpas e classificação. Volume 1. 2012. 4 edição. Autores: Arthur Pinto Chaves e colaboradores



Noções básicas

- ❑ **Ler Capítulo 1 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>



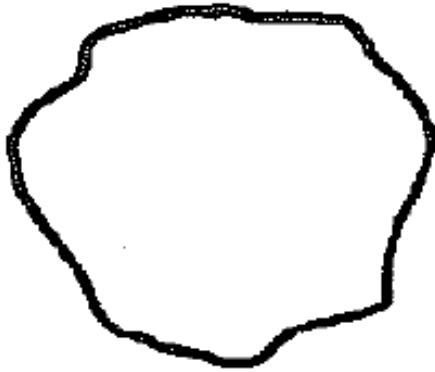
Palavras-chaves

- Mineral, minério, ganga, estéril, rejeito, concentrado, ROM
- Teor, densidade, umidade, porcentagem de sólidos, área específica, distribuição granulométrica, recuperação em massa e metalúrgica.
- Background, anomalia, depósito mineral, corpo de minério, jazida, mina, usina, recurso e reservas

Teor:

- Massa de um elemento ou substância pura, referido a massa total em consideração, sempre considerando-se o peso seco.
 - ▣ Teor de um elemento: gramas de ouro por tonelada de minério;
 - ▣ Teor de uma substância ou mineral: % de caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) em uma argila;
 - ▣ Teor de parte constituinte de um mineral: % de P_2O_5 em um fosfato;
 - ▣ Teor de um conjunto de minerais, substâncias ou elementos: % de terras raras em um mineral;

Teor:



100% de massa
100% de calcopirita
34,43% de cobre



100% de massa
30% de calcopirita
10.33% de cobre

$$\text{Teor do elemento} = \frac{\text{massa do elemento}}{\text{massa total da amostra}} * 100$$

Densidade:

- Densidade real: massa das partículas pelo seu volume
- Densidade aparente: considera o volume de vazios

Umidade:

- Quantidade de água presente no sólido dividida pela massa de sólidos (seca). Chama de umidade base seca, que é a referência em tratamento de minérios.

$$umidade\ (base\ seca) = \frac{massa\ úmida - massa\ seca}{massa\ seca} * 100$$

Porcentagem de sólidos:

- É a massa de sólidos (seca) dividida pela massa de polpa (massa de sólidos mais massa de água). Em tratamento de minérios, o padrão é a porcentagem de sólidos em peso, salvo menção em contrário.

$$\% \text{ de sólidos} = \frac{\text{massa de sólidos}}{\text{massa de sólidos} + \text{massa de água}} * 100$$

$$\% \text{ de sólidos volume } (\% \frac{v}{v}) = \frac{\text{volume de sólidos}}{\text{volume de sólidos} + \text{volume de água}} * 100$$

Porcentagem de sólidos

- Pode ser determinada também pela densidade de polpa (D_p), Densidade dos sólidos (D_{rs}) e densidade do líquido (D_{rl}):

$$\% \text{ sól} = \frac{D_p - 1}{D_p \left(\frac{D_{rs} - D_{rl}}{D_{rs}} \right)} \times 100$$

Massa de sólidos

- Pode ser determinado a partir da densidade de polpa (D_p), volume de polpa (V) e porcentagem de sólidos (%sol):

$$Ms = \frac{D_p \times V \times \% \text{ sól.}}{100}$$

Área específica

- Quociente da área de uma partícula pelo sua massa (ou volume);
- Pode ser medida pela adsorção de gases, permeamtria blaine, permeamtria fischer, BET....
- Na indústria de minério de ferro e cimenteira, é usada principalmente o método blaine, funcionando na prática como uma medida de granulometria.

Distribuição granulométrica

- A medida de tamanho por ser feita de duas maneiras:
 - ▣ Medidas reais de uma ou mais de suas dimensões;



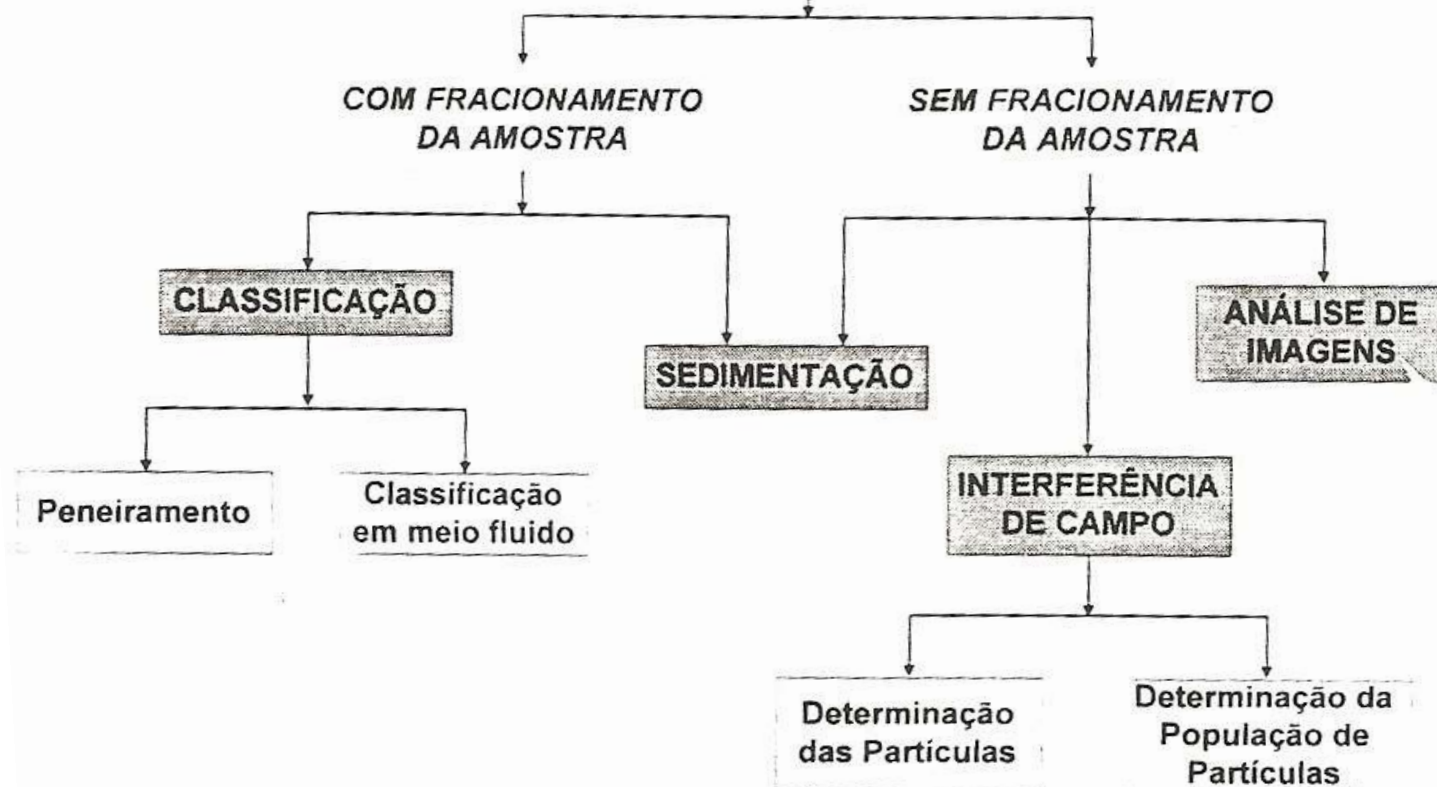
- ▣ Representação por uma esfera de tamanho equivalente.



Esferas de igual volume e superfície

Distribuição granulométrica

MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS



Distribuição granulométrica

- Medida de tamanho em laboratório:
 - ▣ Classificação por peneiras: 5 – 100.000 μm^* ;
 - ▣ Difração laser: 0,1 – 2.000 μm^* ;
 - ▣ Microscopia ótica: 0,2 – 50 μm^* ;
 - ▣ Microscopia eletrônica: 0,005 – 100 μm^* ;
 - ▣ Elutriação (cyclosizer): 5 – 45 μm^* ;
 - ▣ Sedimentação (gravidade): 1 – 40 μm^* ;
 - ▣ Sedimentação (centrifuga): 0,05 – 5 μm^* .

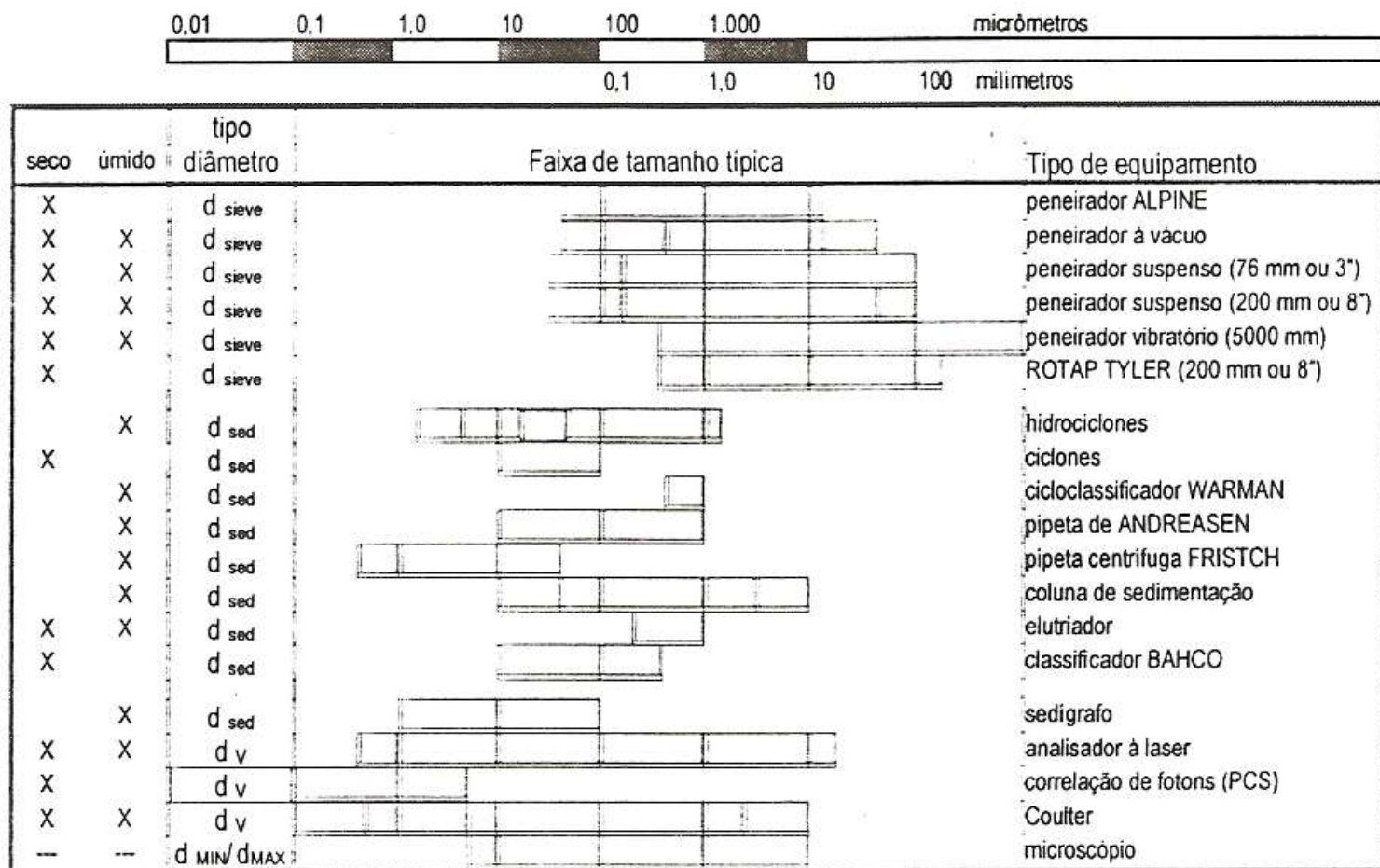
* Tamanhos aproximados.

Distribuição granulométrica

- Correção entre métodos (usar com cautela, varia conforme o material):

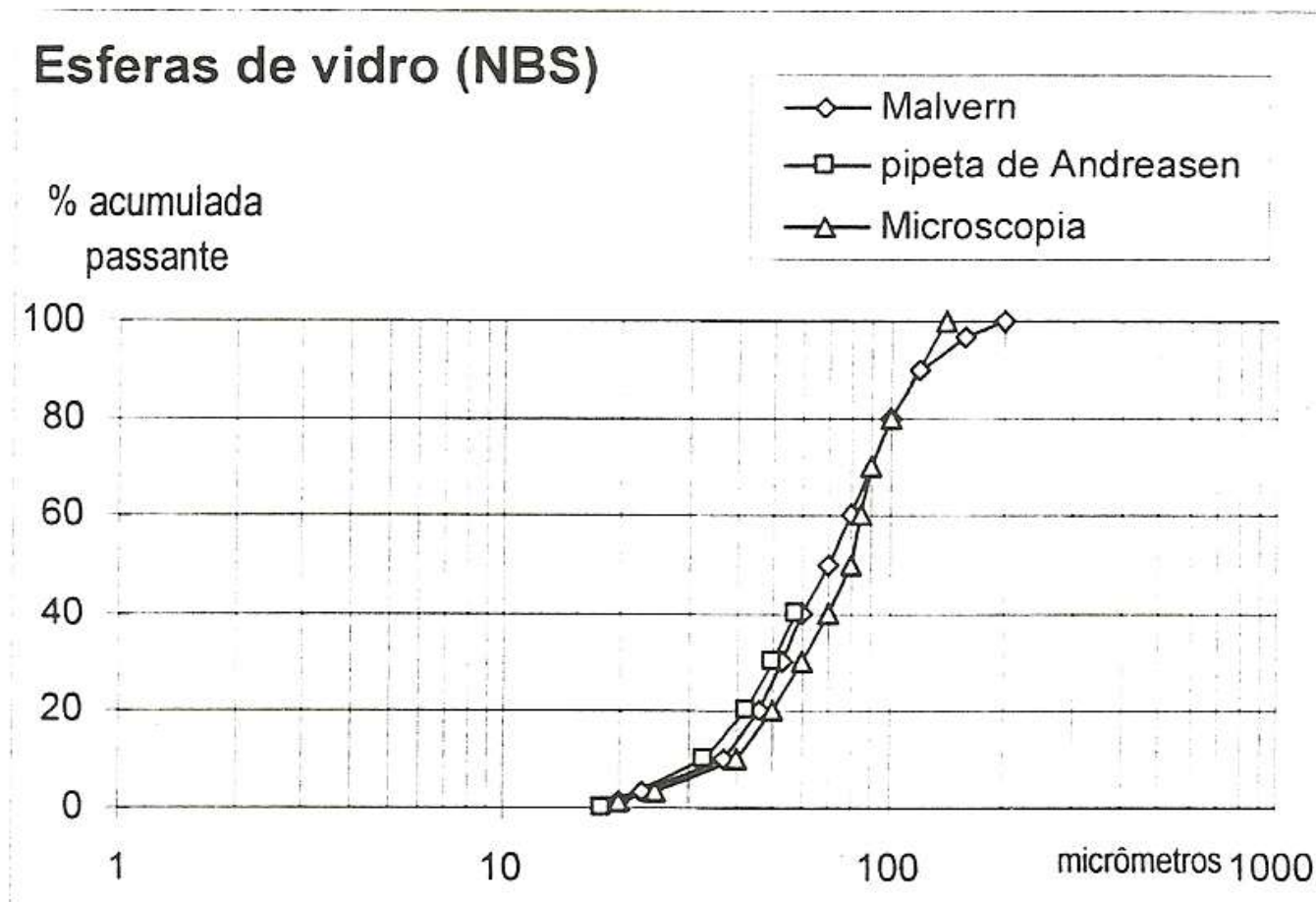
<i>Conversion</i>	<i>Multiplying factor</i>
Sieve size to Stokes' diameter (sedimentation, elutriation)	0.94
Sieve size to projected area diameter (microscopy)	1.4
Sieve size to laser diffraction	1.5
Square mesh sieves to roundhole sieves	1.2

□ Escolha do método:



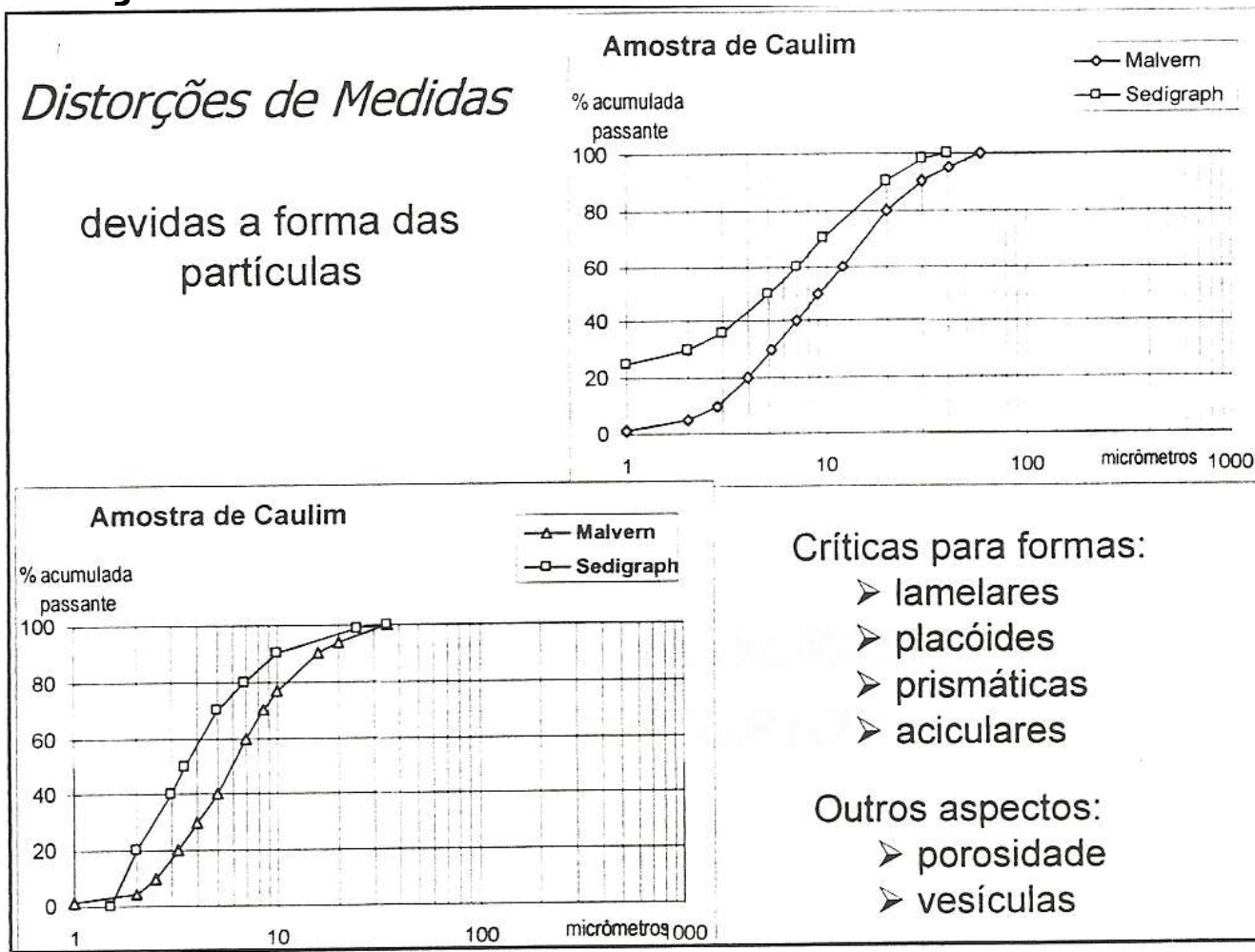
Métodos de determinação de tamanho de partículas

□ Diferenças entre métodos:



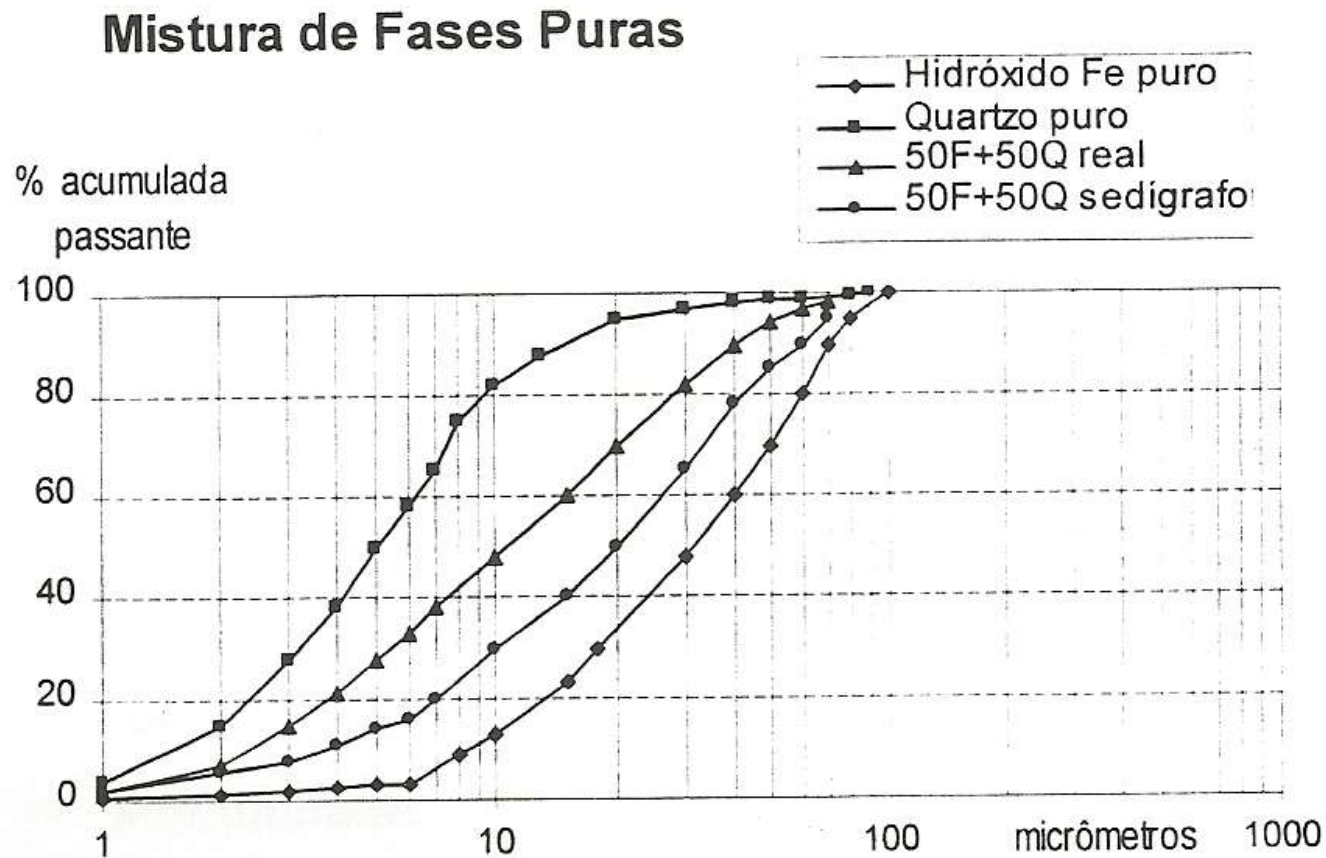
Métodos de determinação de tamanho de partículas

□ Diferenças entre métodos:



Métodos de determinação de tamanho de partículas

□ Diferenças entre métodos:



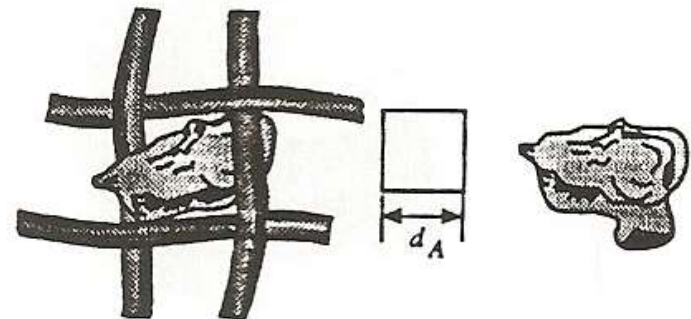
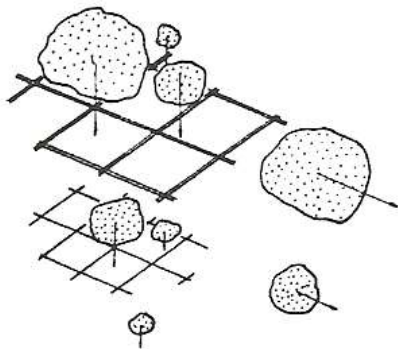
Métodos de determinação: peneiramento

□ Função de 2 dimensões:

- Máxima largura;
- Máxima espessura.

□ Diâmetro nominal:

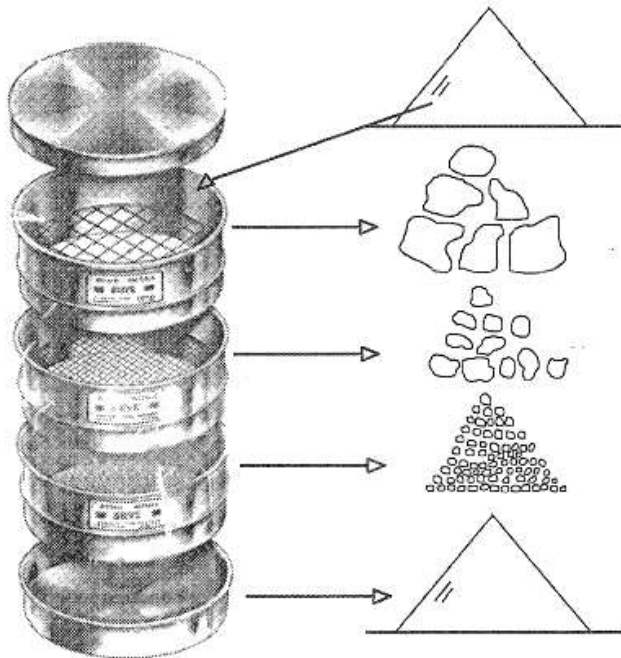
- Obtido por comparação com um padrão (malha);
- Definido pela menor dimensão da abertura da malha pela qual passa a partícula;
- “malha” significa o número de aberturas contidas por polegada



Métodos de determinação: peneiramento

□ Peneiras de laboratório:

- Circulares: 20,3 cm (8"), 15,2 cm (6") ou 7,6 cm (3");
- Circulares ou quadradas de 50 cm de diâmetro.



Métodos de determinação: peneiramento

- Séries padronizadas de peneiras:
 - ▣ German standard;
 - ▣ DIN 41 88;
 - ▣ ASTM E11;
 - ▣ American Tyler;
 - ▣ French standard;
 - ▣ British BS 1796.

Métodos de determinação: peneiramento

- Séries padronizadas de peneiras (obs.: mesh=linhas por pol):

Tyler	U.S (L.C584 - ASTME11)		British Standard		ABNT			German DIN(1171)	
	Mesh	Aberturas	Mesh	Aberturas			Aberturas	DIN	Aberturas
	nº	mm	nº	mm	nº	Denominação	mm	nº	mm
3½	3½	5,66	...	...	...	...	...	1	6,000
4	4	4,76	...	...	4	4,8 mm	4,8	...	...
5	5	4,00	...	...	5	4,0 mm	4,0	...	...
6	6	3,36	5	3,353	6	3,4 mm	3,4	2	3,000
7	7	2,83	6	2,812	7	2,7 mm	2,7	...	...
8	8	2,38	7	2,411	8	2,4 mm	2,4	2½	2,400
9	10	2,00	8	2,057	10	2,0 mm	2,0	3	2,000
10	12	1,68	10	1,676	12	1,7 mm	1,7	4	1,500
12	14	1,41	12	1,405	14	1,4 mm	1,4	...	...
14	16	1,19	14	1,204	16	1,2 mm	1,2	5	1,200
16	18	1,00	16	1,003	18	1,0 mm	1,0	6	1,020

Métodos de determinação: peneiramento

□ Séries padronizadas de peneiras:

Tyler			U.S (L.C584 - ASTME11)		British Standard		ABNT		German DIN(1171)	
Mesh	Mesh	Aberturas	Mesh	Aberturas	Mesh	Aberturas	Mesh	Aberturas	DIN	Aberturas
	nº	mm	nº	mm	nº	Denominação	mm		nº	mm
20	20	0,84	18	0,853	20	0,840 mm	0,840	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	8	0,750	...
24	25	0,71	22	0,699	25	0,700 mm	0,700	...	...	...
28	30	0,59	25	0,599	...	...	...	10	0,600	...
...	...	...	...	...	...	...	...	11	0,540	...
32	35	0,50	30	0,500	35	0,500 mm	0,500	12	0,490	...
35	40	0,42	36	0,422	40	0,420 mm	0,420	14	0,430	...
42	45	0,35	44	0,353	45	0,350 mm	0,350	16	0,385	...
48	50	0,297	52	0,295	50	0,300 mm	0,300	20	0,300	...
60	60	0,250	60	0,251	60	0,250 mm	0,250	24	0,250	...
65	70	0,210	72	0,211	70	0,210 mm	0,210	30	0,200	...

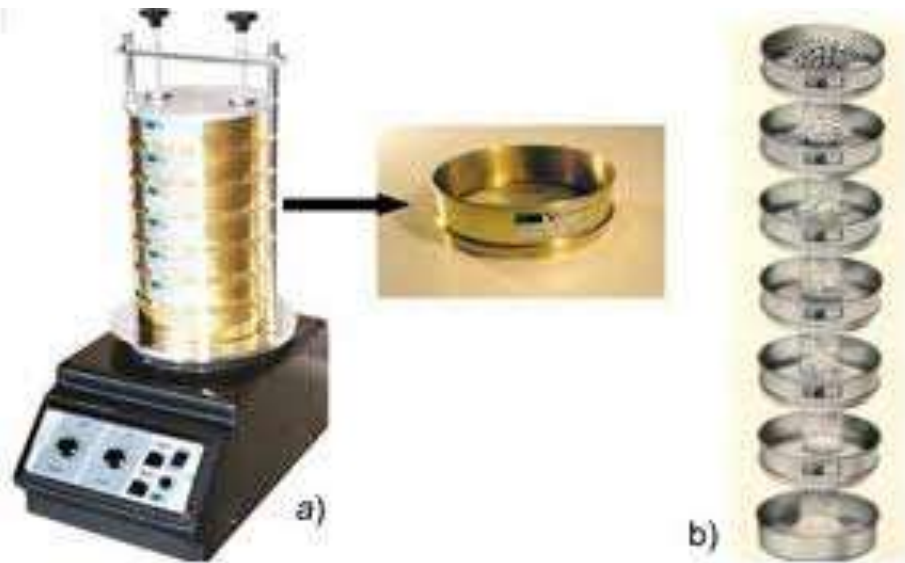
Métodos de determinação: peneiramento

□ Séries padronizadas de peneiras:

Tyler			U.S (L.C584 - ASTME11)		British Standard		ABNT			German DIN(1171)	
Mesh	Mesh	Aberturas	Mesh	Aberturas	Mesh	Aberturas	Mesh	Denominação	Aberturas	DIN	Aberturas
	nº	mm	nº	mm	nº	mm	nº	Denominação	mm	nº	mm
170	170	0,088	170	0,089	170	0,088 mm	0,088	70	0,088	...	...
200	200	0,074	200	0,076	200	0,074 mm	0,074	80	0,075	...	...
250	230	0,062	240	0,066	230	0,063 mm	0,063	100	0,060	...	...
270	270	0,053	300	0,053	270	0,053 mm	0,053	...	...	...	...
325	325	0,044	...	...	325	0,045 mm	0,044	...	...	...	...
400	400	0,037	...	...	400	0,037 mm	0,037	...	...	...	...
450	450	0,032	450	0,028	450	0,036 mm	0,088	...	...	...	...
500	500	0,025	500	0,025	...	0,032 mm	0,074	...	...	...	...
635	635	0,020	635	0,020	500	0,025 mm	0,063	...	...	...	...
850	850	0,010	...	...	635	0,020 mm	0,053	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	0,010 mm	0,010	...	...	...	...

Métodos de determinação: peneiramento

□ Peneiradores de laboratório:



Agitador de peneiras



Agitador de peneiras quadradas

Métodos de determinação: peneiramento

□ Peneiradores de laboratório:



Peneirador suspenso vibratório



Rotap

Métodos de determinação: peneiramento

□ Escolha das malhas de peneiramento:

- Em geral, as séries de peneiramento tem peneiras a cada raiz quarta de 2 (1,189) ou raiz décima de dez (1,259).
- É suficiente uma razão raiz de 2 (1,414) entre uma malha e outra;
- Ao redor da malha de interesse, pode-se usar a raiz quarta de 2 entre as malhas.

Métodos de determinação: peneiramento

□ Representação de resultados:

□ Tabelas:

- Frequência (%) de diâmetros por intervalo de tamanho;

□ Histogramas;

□ Curvas de distribuição de frequências:

- Escala linear;
- Escala logarítmica;

□ Curvas acumuladas de distribuição de frequências:

- Linear;
- Logarítmica (Gaudin-Schuhmann);
- Probabilidade (Gauss);
- Rossin-Rammler.

Métodos de determinação: peneiramento

□ Representação de resultados:

▣ Tabelas:

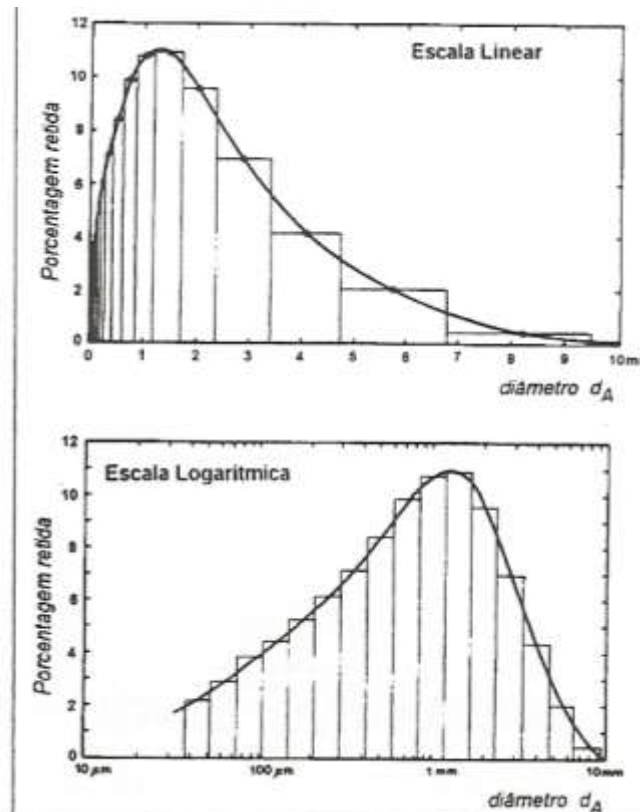
- Frequência (%) de diâmetros por intervalo de tamanho;

Abertura de malhas (mm)	Diâmetro médio (mm)	% em peso		
		retida	acumulada passante	retida
+ 9,50	11,55	0,03	99,97	0,03
- 9,50 + 6,80	8,15	0,43	99,54	0,46
- 6,80 + 4,75	5,78	2,03	97,51	2,49
- 4,75 + 3,40	4,08	4,17	93,34	6,66
- 3,40 + 2,36	2,88	6,97	86,37	13,63
- 2,36 + 1,70	2,03	9,59	76,78	23,22
- 1,70 + 1,18	1,44	10,94	65,84	34,16
- 1,18 + 0,850	1,02	10,80	55,04	44,96
- 0,850 + 0,600	0,725	9,91	45,13	54,87
- 0,600 + 0,425	0,512	8,42	36,71	63,29
- 0,425 + 0,300	0,362	7,12	29,59	70,41
- 0,300 + 0,212	0,257	6,10	23,49	76,51
- 0,212 + 0,150	0,181	5,23	18,26	81,74
- 0,150 + 0,106	0,128	4,38	13,88	86,12
- 0,106 + 0,075	0,09	3,85	10,03	89,97
- 0,075 + 0,053	0,064	2,91	7,12	92,88
- 0,053 + 0,038	0,045	2,14	4,98	95,02
- 0,038	0,019	4,98		100,00

Métodos de determinação: peneiramento

- Representação de resultados:
 - Curvas de distribuição de frequências com histograma:
 - Escala linear;

*Gráficos de
Frequência
Simples
com
Histogramas*



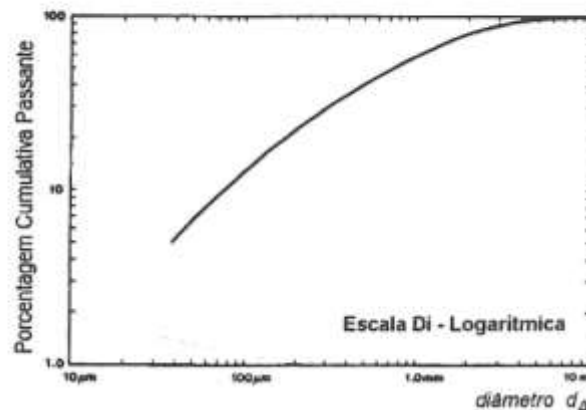
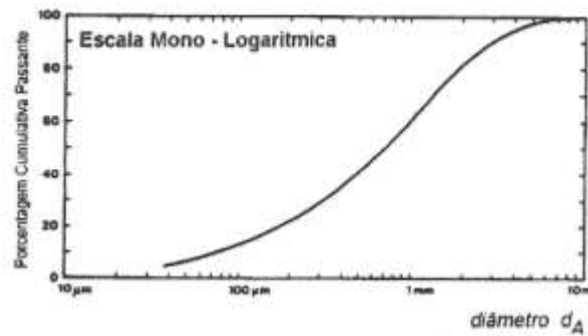
Métodos de determinação: peneiramento

□ Representação de resultados:

▣ Curvas acumuladas de distribuição de frequências:

- Linear / Logarítmica (Gaudin-Schuhmann);

*Gráficos de
Frequência
Acumulada*



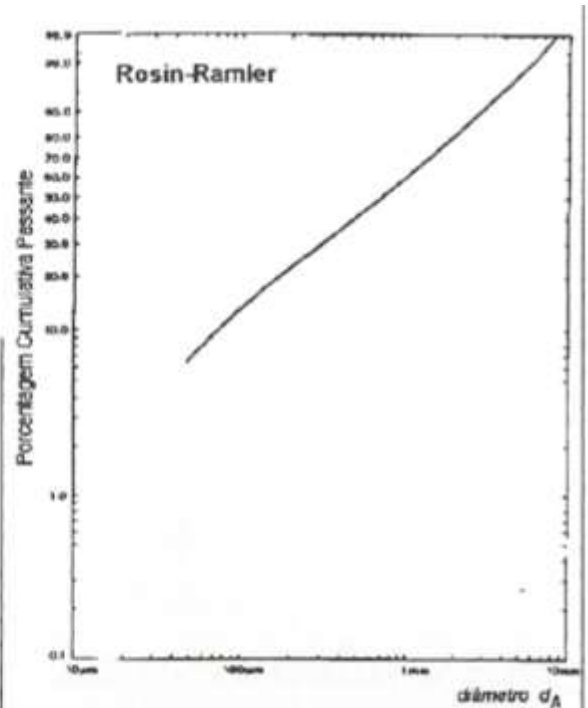
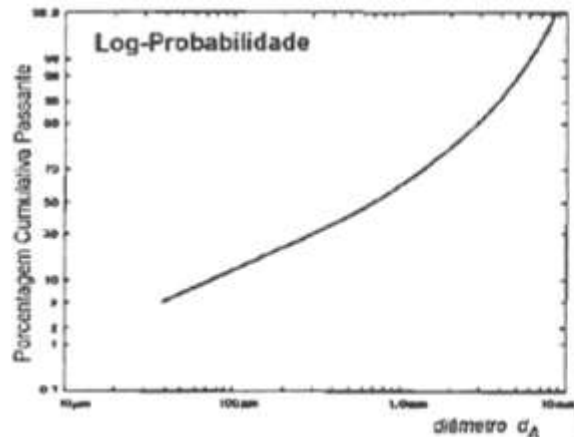
Métodos de determinação: peneiramento

□ Representação de resultados:

▣ Curvas acumuladas de distribuição de frequências:

- Probabilidade (Gauss) / Rossin-Rammler.

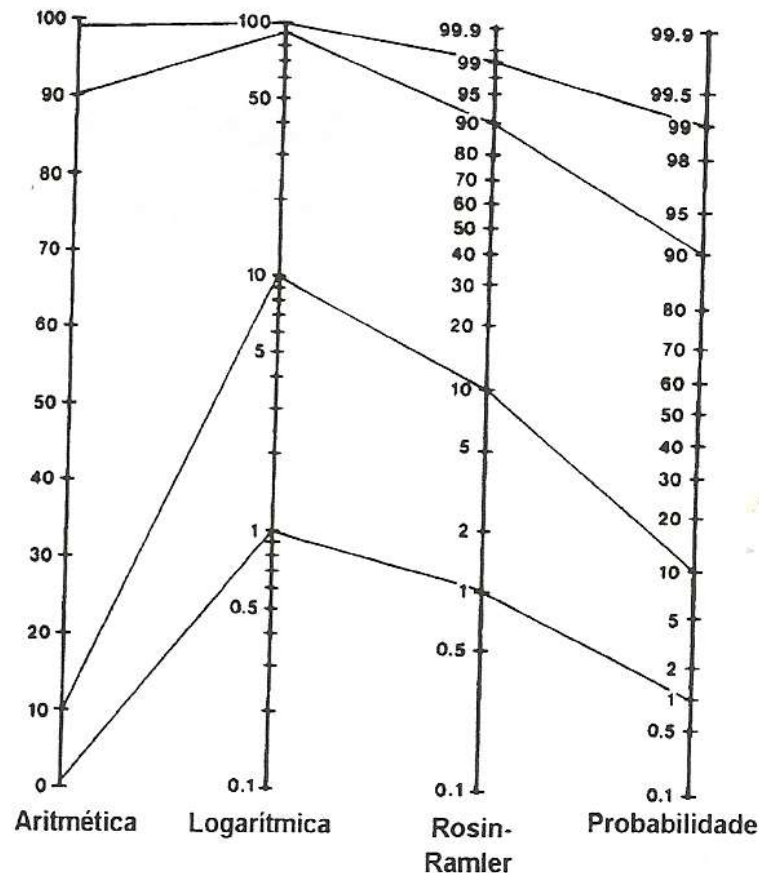
*Gráficos de
Frequência
Acumulada*



Métodos de determinação: peneiramento

□ Representação de resultados:

▣ Comparação entre escalas de frequência acumulada:

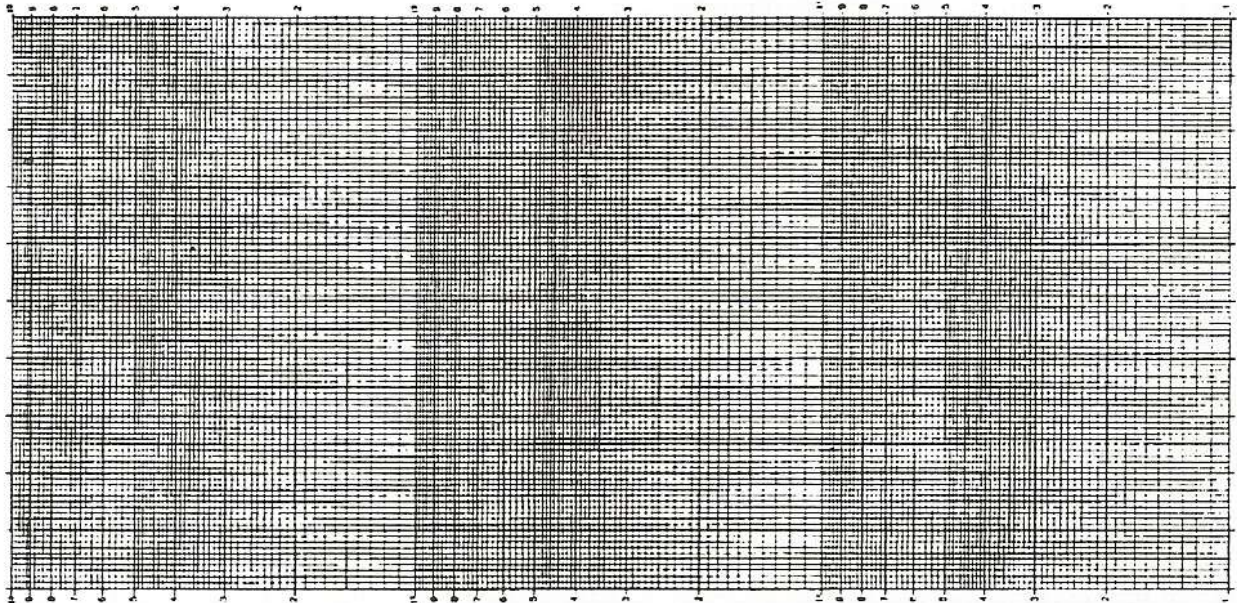


□ Representação de resultados:



Métodos de determinação: peneiramento

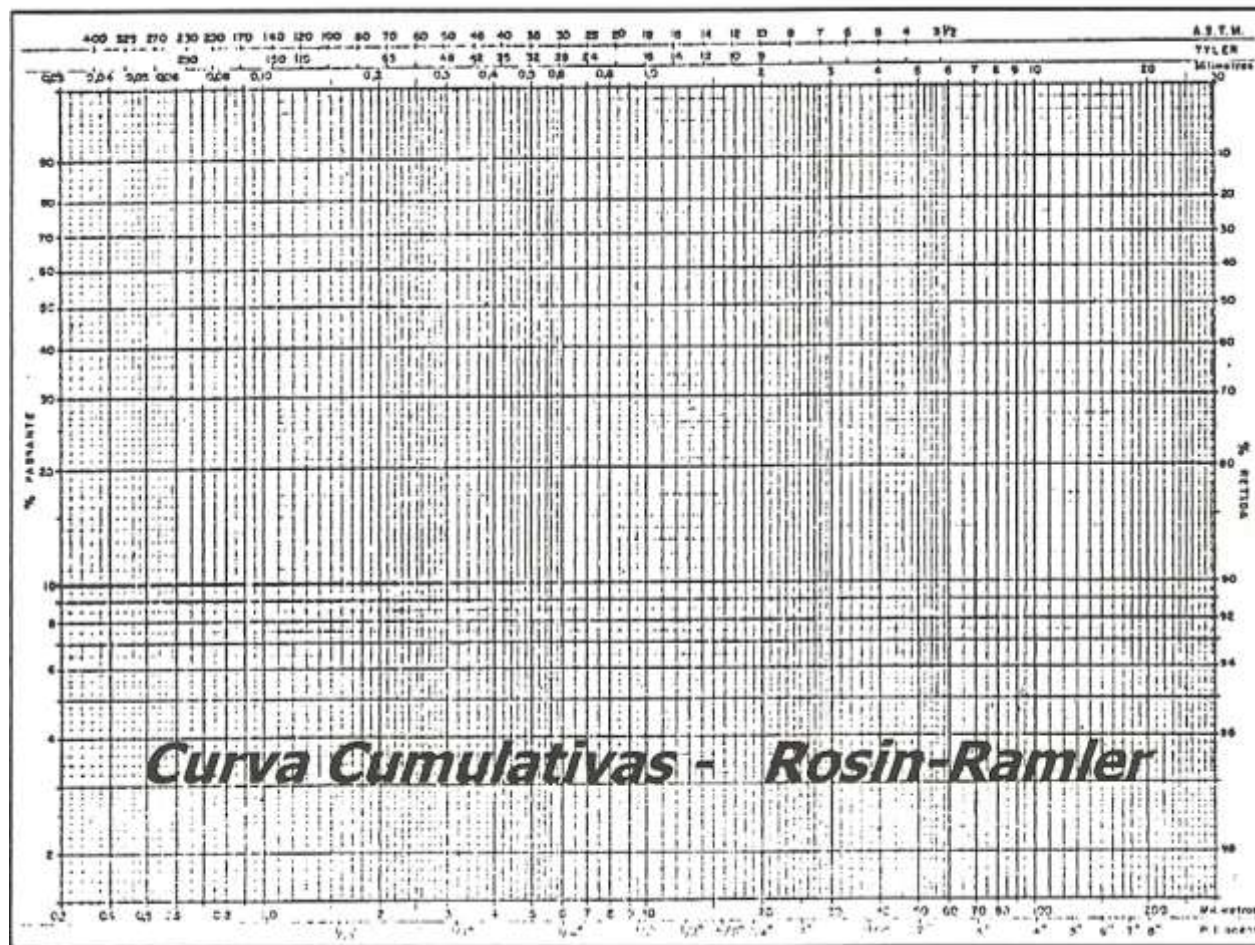
- Representação de resultados:



***Curva Cumulativas - Di-log
Gaudin- Schuhmann***

Métodos de determinação: peneiramento

□ Representação de resultados:



Métodos de determinação: peneiramento

□ Normas:

- ▣ AS 1411.11 (1980) Distribuição do tamanho de partículas por peneiramento a seco (para pedreiras);
- ▣ AS 3881 (1991): granulometria de carvão;
- ▣ ISO 2591-1 (1988): peneiramento com telas de malha e metal;
- ▣ BS 1796 (1976): análise granulométrica.

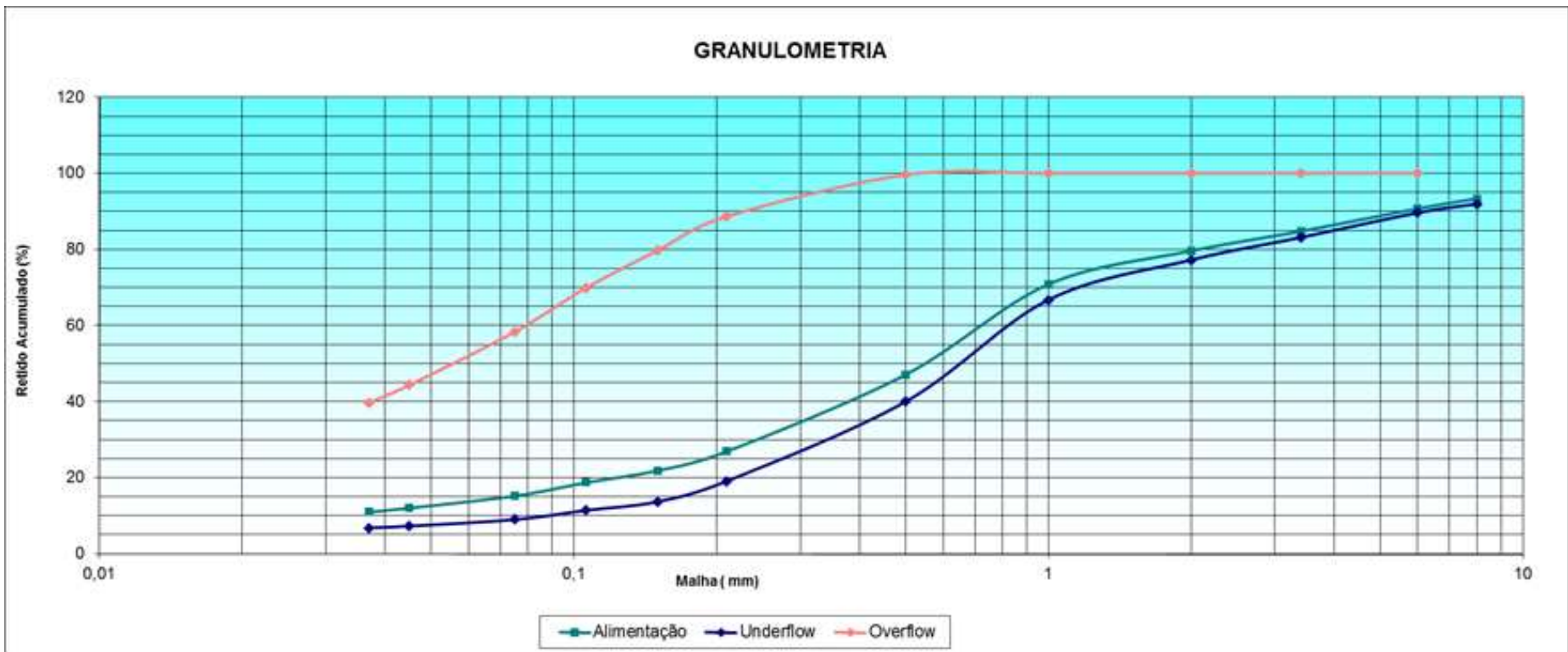
Distribuição granulométrica

□ Exercício:

Dada a distribuição granulométrica de alimentação e produto de um moinho e de um circuito de moagem, informar o F80 e P80 do moinho e do circuito de moagem. Qual a relação de redução do moinho e do circuito como um todo?

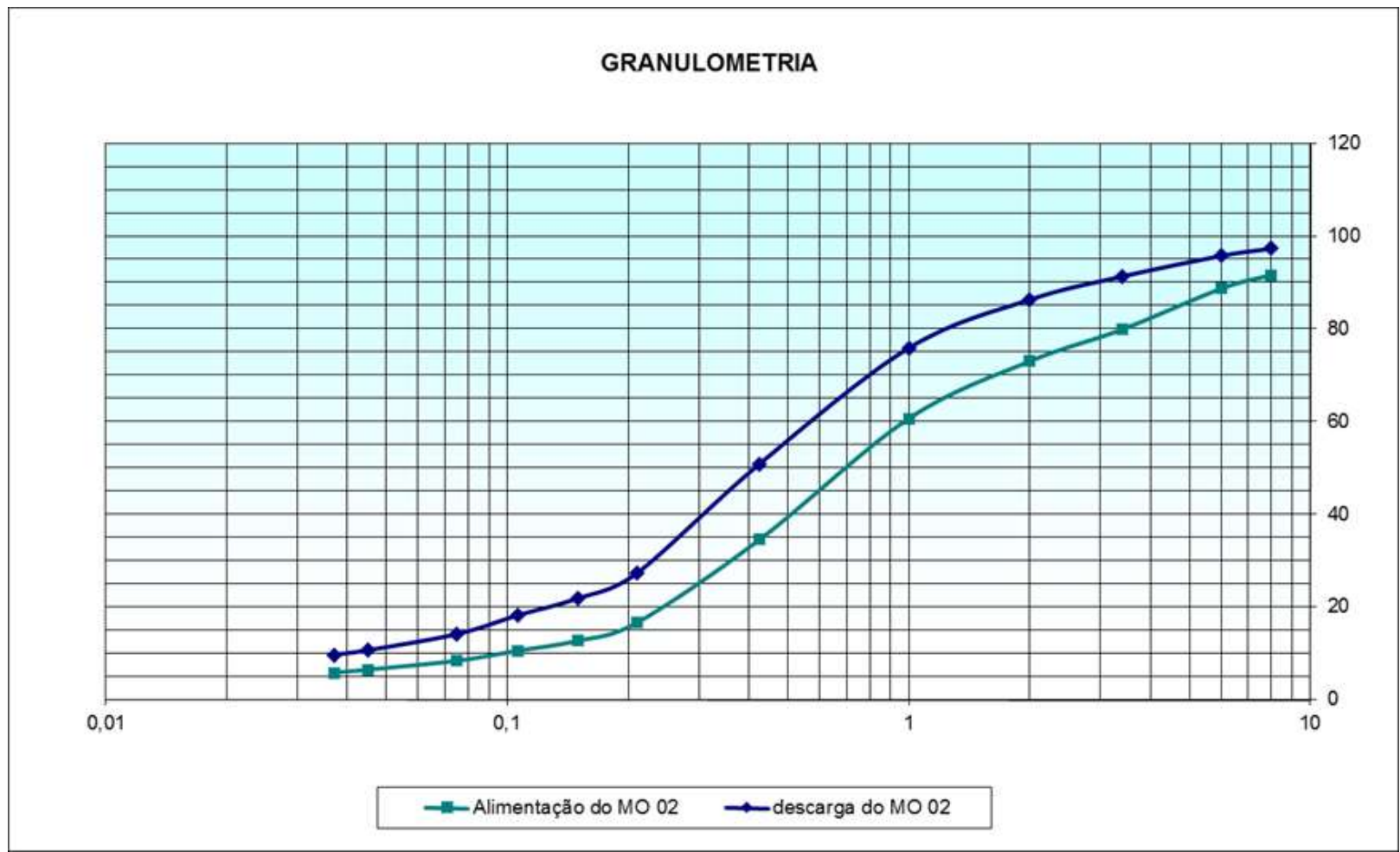
Distribuição granulométrica

Exercício:



Distribuição granulométrica

□ Exercício:



Distribuição granulométrica

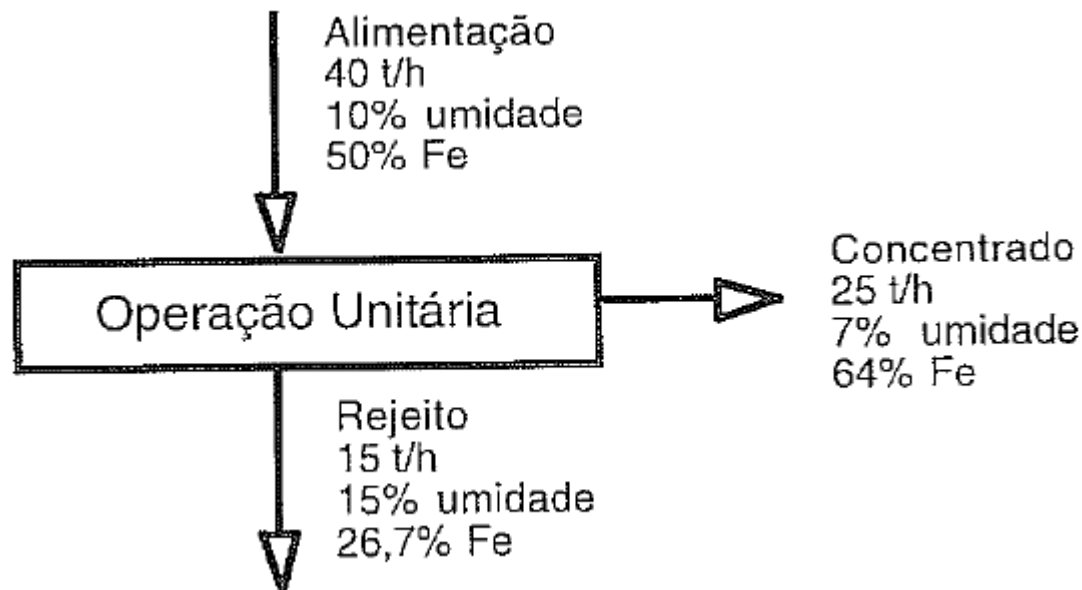
□ Exercício:

Em uma operação de peneiramento, 250 t/h de minério são alimentadas em peneira com tela de 2", resultando em 161,5 t/h de *oversize*, segundo as distribuições granulométricas apresentadas abaixo. Qual o P_{98} , P_{80} e P_{50} dos três fluxos desta peneira? Qual a vazão em massa do *undersize*?

Malha	8"	4"	2"	1"	1/2"	1/4"	-1/4"
Alimentação (%)	0	22,0	33,0	18,0	12,0	10,0	5,0
Oversize (%)	0	34,1	51,1	13,0	0	0	1,9
Undersize (%)	0	0	0	27,1	33,9	28,2	10,7

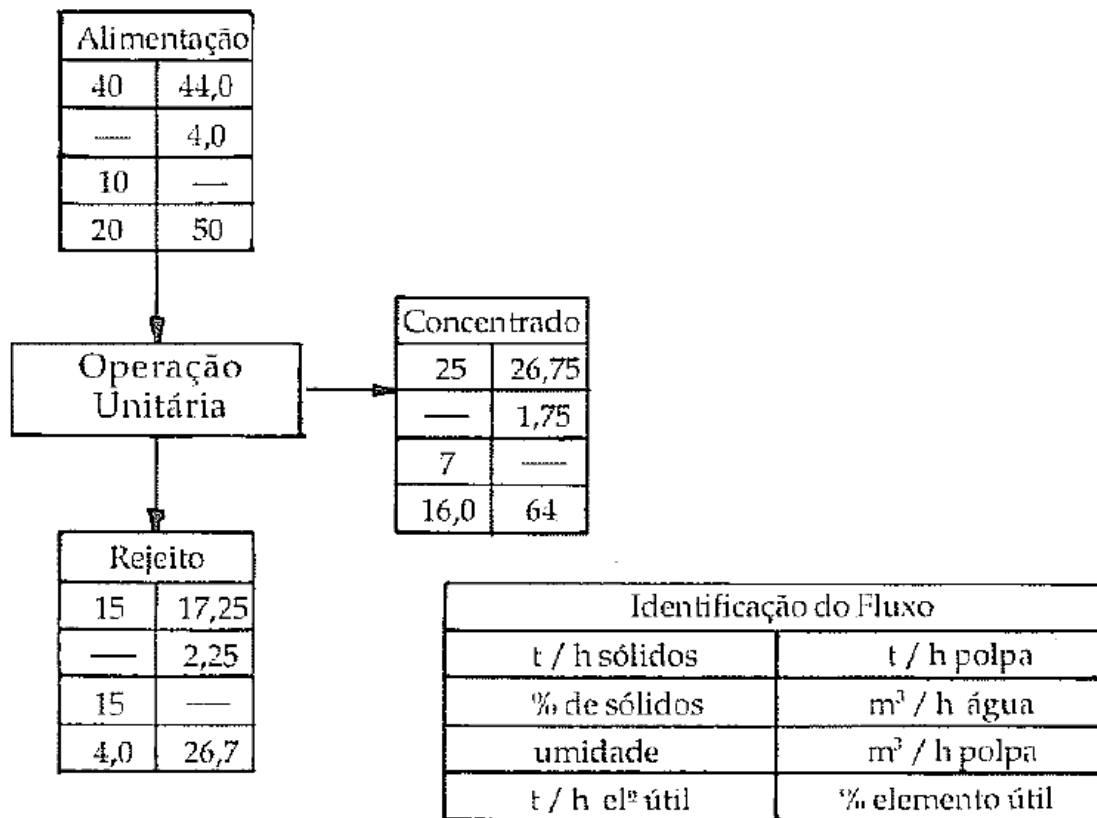
Balanço de massas, metalúrgico e de água:

- É o conceito mais importante do Tratamento de minérios e a principal ferramenta do engenheiro tratamentista. Baseia-se na Lei de Lavoisier: todas as massas que entram em uma operação unitária tem que sair nos seus produtos.



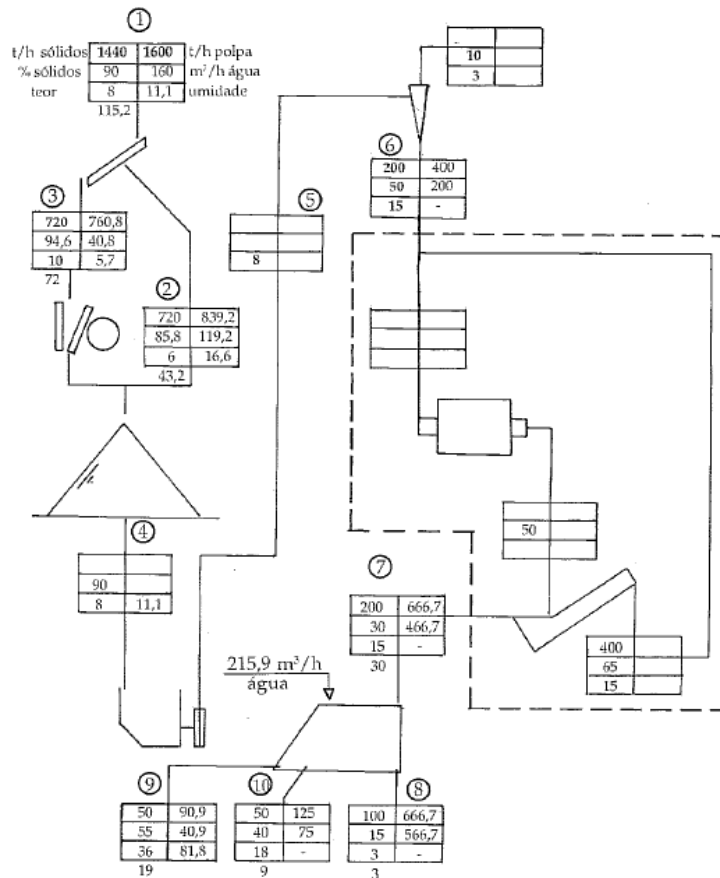
Balanço de massas, metalúrgico e de água:

□ Representação gráfica:



Balanço de massas, metalúrgico e de água:

□ Representação gráfica:



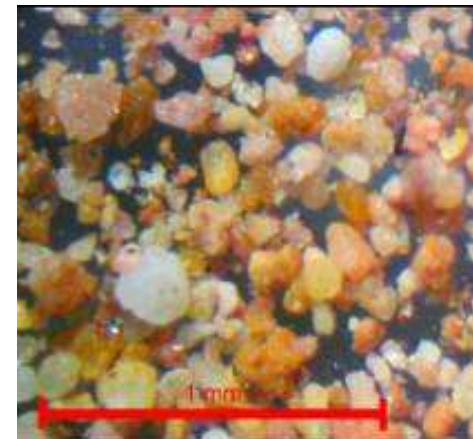
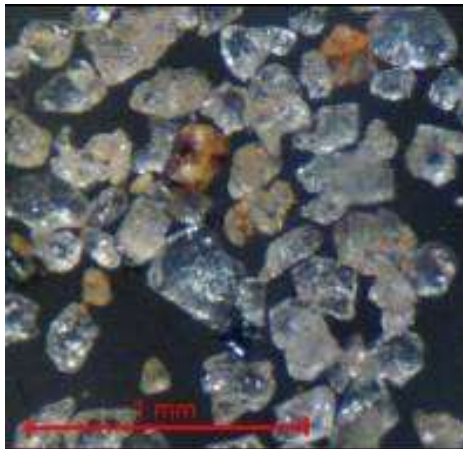
Balanço de massas, metalúrgico e de água

47

□ Recuperação do mineral de interesse:



Fonte: University (2005)



Balanço de massas, metalúrgico e de água:

- Recuperação em massa:

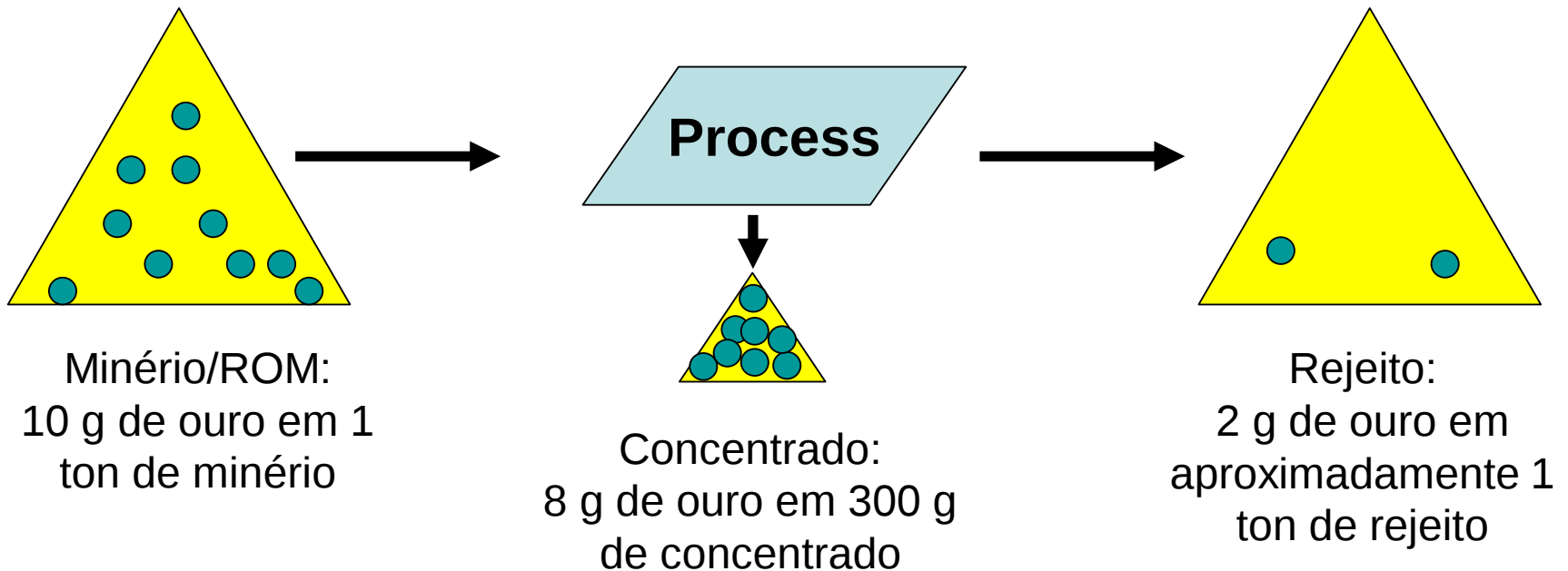
$$Rm = \frac{Mc}{Ma} = \frac{Ta - Tr}{Tc - Tr}$$

- Recuperação em metalúrgica:

$$R_{metal} = Rm * \frac{Tc}{Ta} \text{ ou } \left(\frac{Ta - Tr}{Tc - Tr} \right) * \frac{Tc}{Ta}$$

- Dedução...

Balanço de massas, metalúrgico e de água:



Distribuição/partição/recuperação do ouro para o concentrado. = 80%

Distribuição/partição do ouro para o rejeito = 20%

Balanço de massas, metalúrgico e de água:

□ Exercício

Dados os teores de alimentação, concentrado e rejeito de uma usina de beneficiamento de minério de ferro, calcular a recuperação em massa e metalúrgica desta usina.

Dados:

Teor de alimentação: 48%

Teor de concentrado: 64%

Teor de rejeito: 30%

Balanço de massas, metalúrgico e de água:

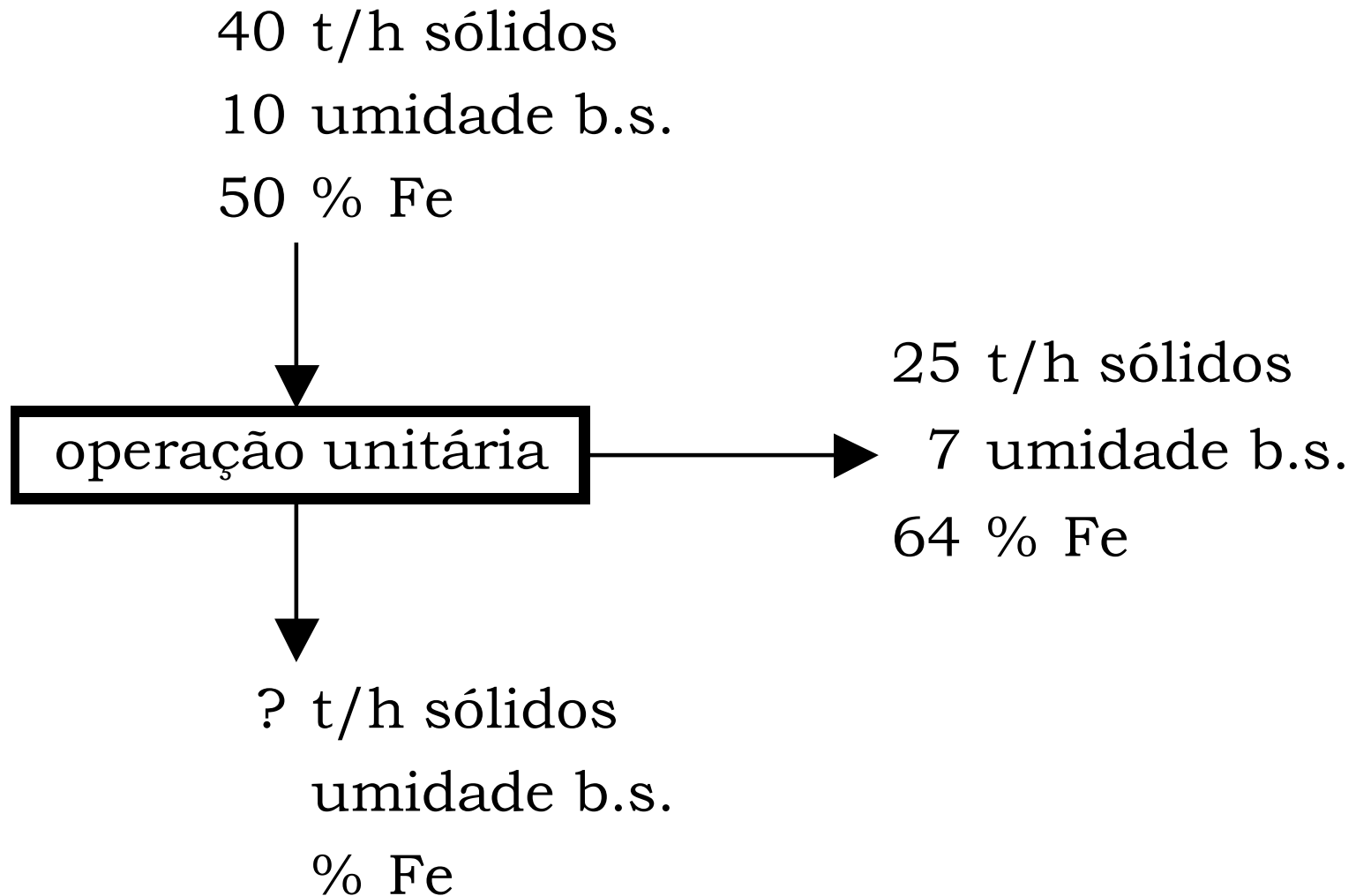
□ Exercício

Dispomos das seguintes informações sobre uma dada operação unitária:

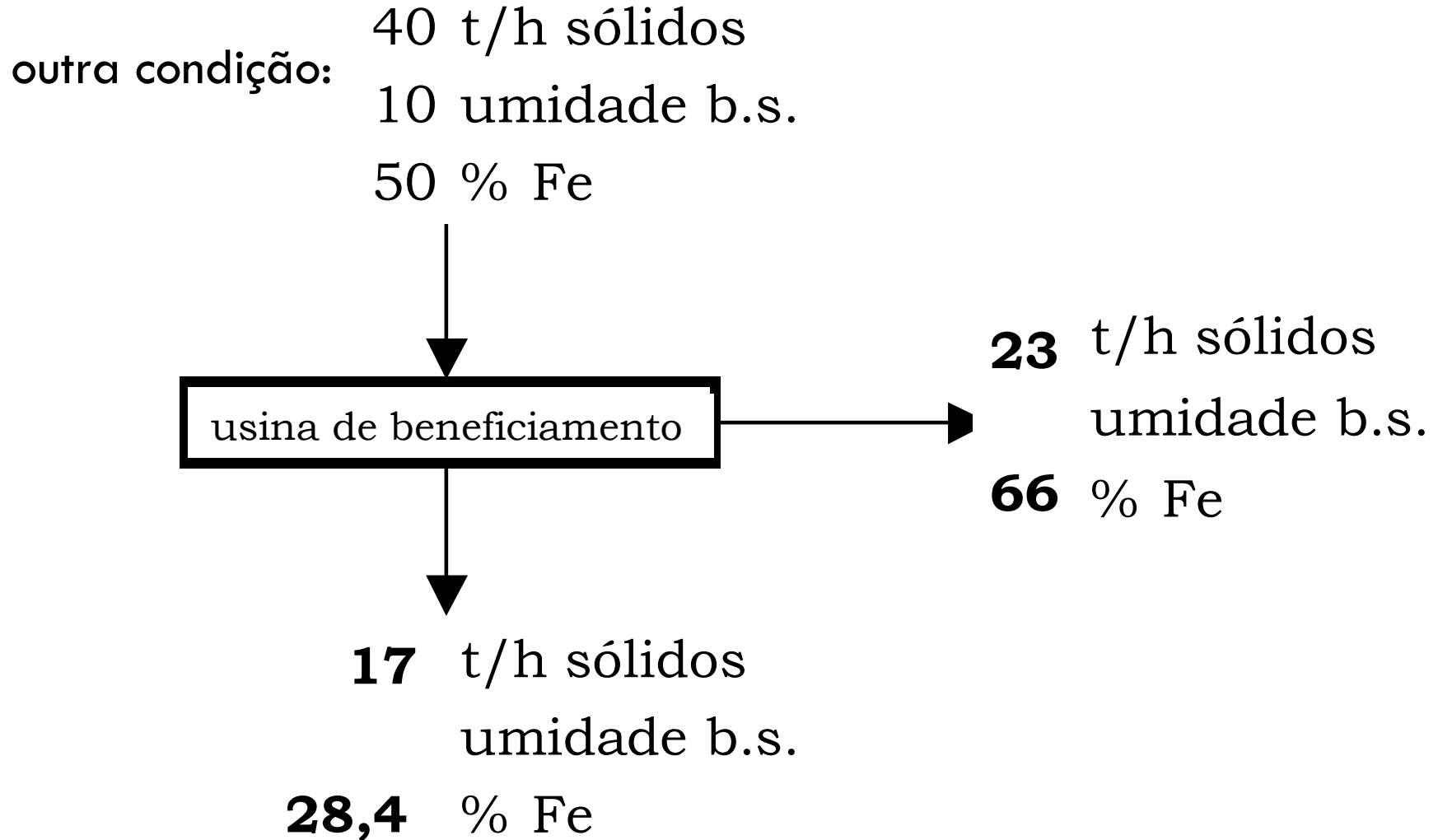
	Vazão de sólidos (t/h)	% sólidos	% Fe	Vazão de polpa (t/h)	Vazão de água (m ³ /h)
Alimentação	40	48	48		
Concentrado	25		64		
Rejeito				50	

Complete a tabela.

Indicadores de desempenho



Indicadores de desempenho



Qual das duas condições é mais interessante?

Indicadores de desempenho



Como avaliar o desempenho desta operação em termos de resultados ?

Indicadores de desempenho

Existem três indicadores básicos:

1 – ENRIQUECIMENTO

$$E = \frac{\text{teor do concentrado}}{\text{teor da alimentação}}$$

primeiro caso:

$$E = \frac{64}{50} = 1,28$$

segundo caso:

$$E = \frac{66}{50} = 1,32$$

Indicadores de desempenho

Existem três indicadores básicos:

2 – RECUPERAÇÃO (de massa)

$$R = \frac{\text{massa do concentrado} \times 100}{\text{massa da alimentação}}$$

primeiro caso:

$$E = \frac{25}{40} = 0,625$$

ou 62,5%

segundo caso:

$$E = \frac{23}{40} = 0,575$$

ou 57,5%

Indicadores de desempenho

Existem três indicadores básicos:

3 – RECUPERAÇÃO METALÚRGICA

massa do elemento de

$$RM = \frac{\text{interesse no concentrado} \times 100}{\text{massa do elemento de interesse na alimentação}}$$

primeiro caso:

$$RM = \frac{25 \times 0,64}{40 \times 0,5} = 0,80$$

ou 80,0%

segundo caso:

$$RM = \frac{23 \times 0,66}{40 \times 0,5} = 0,76$$

ou 76,0%

Indicadores de desempenho

Que significam eles ?

1 – ENRIQUECIMENTO

Quantas vezes o teor do elemento de interesse aumentou no concentrado.

No primeiro caso:

$$E = \frac{64}{50} = 1,28 \text{ vezes}$$

Indicadores de desempenho

Que significam eles:

2 – RECUPERAÇÃO (de massa)

Quanto da massa inicial (alimentação) foi para o concentrado.

No primeiro caso:

$$E = \frac{25}{40} = 0,625 \text{ ou } 62,5\%$$

Indicadores de desempenho

Que significam eles:

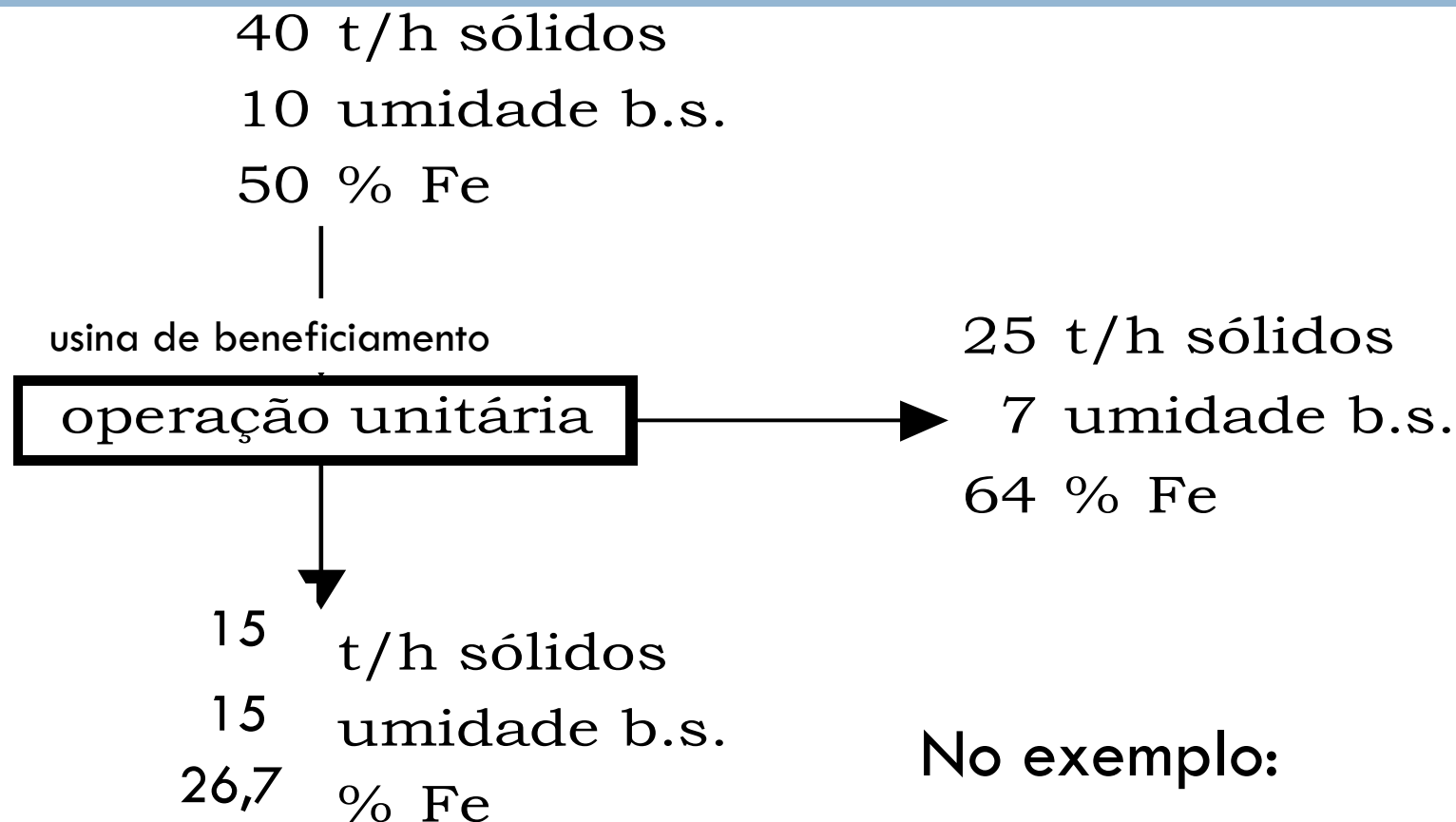
3 – RECUPERAÇÃO METALÚRGICA

quanto da **massa do elemento** de interesse, contida na alimentação, passou para o concentrado

No primeiro caso:

$$RM = \frac{25 \times 0,64}{40 \times 0,5} = 0,80 \text{ ou } 80,0\%$$

Indicadores de desempenho



No exemplo:

$$\text{Rec} = \frac{t_{\text{alimentação}} - t_{\text{rejeito}}}{t_{\text{concentrado}} - t_{\text{rejeito}}} = \frac{50 - 26,7}{64 - 26,7} = 0,625$$

Indicadores de desempenho



Existem outros
avaliadores de desempenho?

Sim.

SCHULTZ, N.F. Separation efficiency, *Transactions
SME, AIME*, v. 247 (mar 1970), p. 81-87

Descreve 37 indicadores
e propõe o seu.

REFERÊNCIAS:

- CHAVES, A.P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. São Paulo: Signus Editora, 4 edição, 2012. vol. 1.
- HOBURG, H. **Applications of mineral processing in waste treatment and scrap recycling**. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 18th, 1993, Sydney. Proceedings. Sydney: IMPC, 1993. p..
- KAHN, H. **Caracterização tecnológica de matérias primas minerais**. Apostila do Curso de Extensão de Caracterização tecnológica de matérias primas minerais. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2006.
- NAKAO, O. **Estratégias de educação, preparação e formação docente para o ensino da engenharia**. Palestra sobre ensino de engenharia. Poços de Caldas: Universidade Federal de Alfenas, 2011.
- NAPIER-MUNN, T.; WILLS, B.A. **Wills's mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. 6th ed. Oxford: Elsevier, 2006.
- Imagens google images e do autor.