



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ENGENHARIA QUÍMICA

LOQ 4016 – OPERAÇÕES UNITÁRIAS EXPERIMENTAL I

Profa. Lívia Chaguri
E-mail: Ichaguri@usp.br

EMENTA

1- Redução de Tamanho

- Fundamentos/Caracterização granulométrica
- Equipamentos: britadores e moinhos
- Energia consumida (Leis de Rittinger, Kick e Bond)
- Práticas em laboratório

2- Peneiramento

- Fundamentos
- Análise granulométrica: métodos diferencial e integral
- Cálculo da superfície específica e número de partículas em sólidos particulados
- Eficiência de peneiras
- Práticas em laboratório

Caracterização de Partículas Sólidas

O que é um sólido particulado?

Um material composto de materiais sólidos de tamanho reduzido (partículas).

O tamanho pequeno das partículas pode ser uma característica natural do material ou pode ser devido a uma prévia fragmentação.



Caracterização de Partículas Sólidas

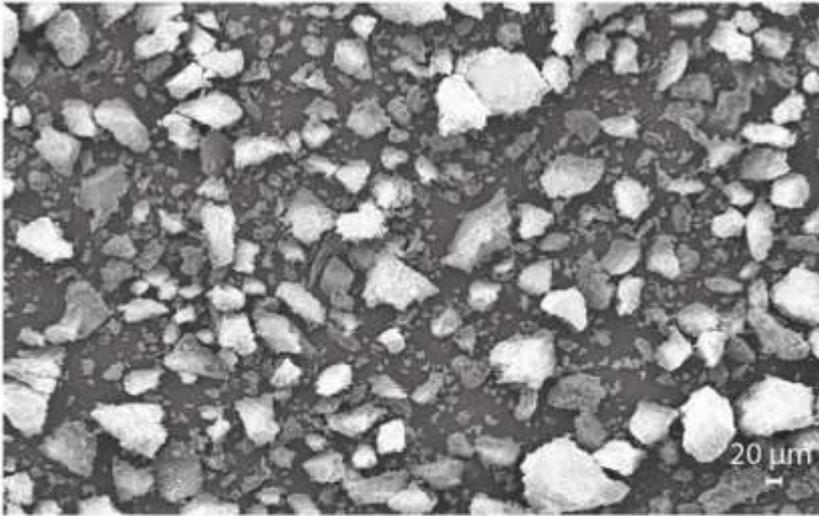


Figura 6.1a Microfotografia de uma amostra de aglomerados secos de levedura de recuperação (ampliação de 300 vezes – MELO, 2010).

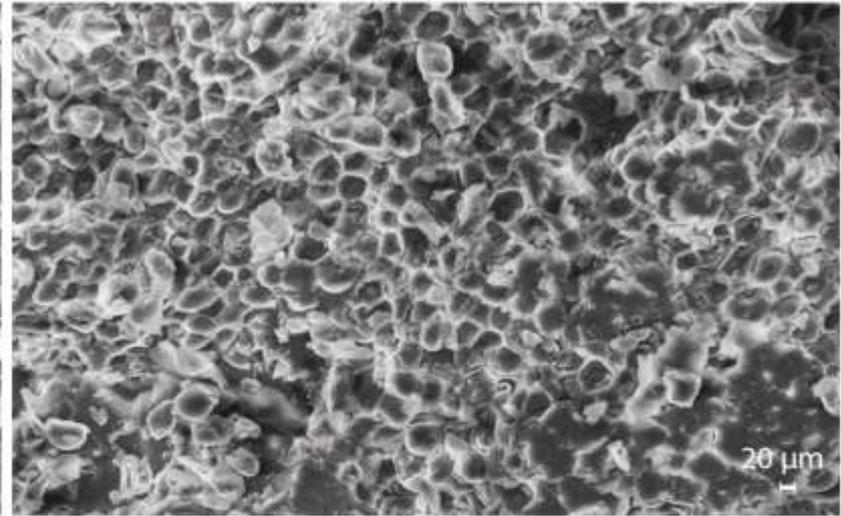
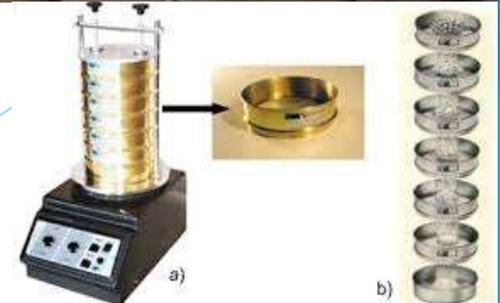


Figura 6.1b Microfotografia de uma "partícula" de levedura de recuperação (ampliação de 3.000 vezes – MELO, 2010).

Caracterização de Partículas Sólidas

- ✓ Constituem em muitos produtos e matérias primas da indústria,
- ✓ Manuseio: de diferentes maneiras dentro de uma planta de processamento industrial.
- ✓ Operações que envolvem sólidos são:
 - mistura,
 - fragmentação ou redução de tamanho,
 - peneiramento,
 - fluidização,
 - filtração,
 - sedimentação,
 - adsorção,
 - escoamento em leitos granulares (leito fixo),
 - transporte de sólidos etc.



Caracterização de Partículas Sólidas

- ✓ Projeto das operações: característica do produto moído.
- ✓ Propriedades e características dos sólidos.
- ✓ Propriedades: dependem na natureza do sólido, da sua constituição física ou química
 - dureza,
 - densidade real
- ✓ Propriedades: associadas ao conjunto de sólidos:
 - densidade aparente,
 - área específica,
 - fração de vazios,
 - ângulo de repouso natural

Classificação sólidos: tamanho

Caracterização granulométrica

Importante para:

- Especificar o tamanho desejado da partícula
- Calcular a energia necessária para realizar a moagem
- Determinar outras características do produto moído

Pós → Partículas de 1 μm até 0,5 mm

Sólidos granulares → Partículas de 0,5 a 10 mm

Blocos pequenos → Partículas de 1 a 5 cm.

Blocos médios → Partículas de 5 a 15 cm.

Blocos grandes → Partículas > 15 cm.

Propriedades das Partículas

Densidade:

Propriedade básica de qualquer material

Para sólidos granulares vários tipos de densidade são definidas:

- Bulk (ρ_b) – depende do tamanho das partículas, inclui vazios.
- Aparente (ρ_{ap}) – relacionada com a medida da qtdade de ar armazenado entre as partículas.
- Real (ρ_t) – relacionada com a densidade dos componentes químicos que compõem a partícula.

Propriedades das Partículas

Fração de Vazios:

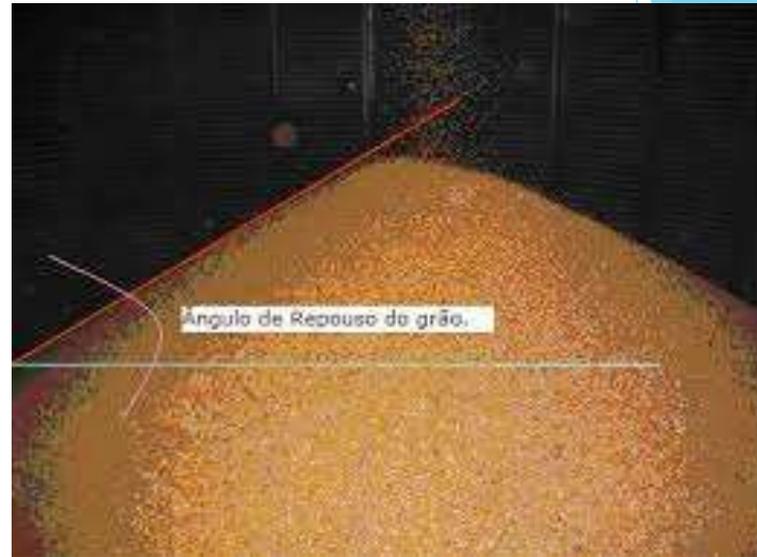
Relação entre o volume do espaço entre as partículas e o volume total:

Porosidade das partículas (ϵ):

Razão do volume de poros dentro da partícula (individual) pelo volume total da partícula,
Descrita pela equação:

Propriedades das Partículas

Ângulo de repouso:



Esfericidade da partícula (ϕ):

Expressa a forma de uma única partícula, sendo independente de seu tamanho.

Propriedades das Partículas - Uniformes

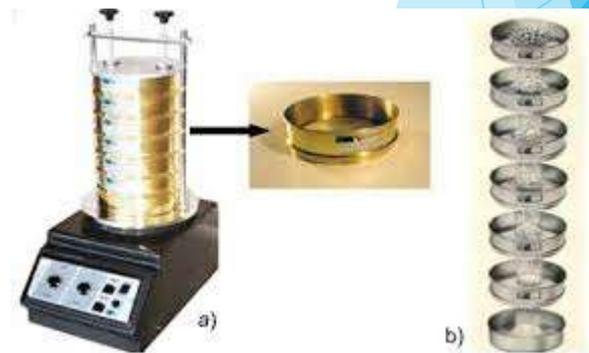
Para partículas uniformes, a determinação do número, volume e superfície externa é mais simples que quando são heterogêneas.

Como determinar o tamanho das partículas?

Microscópio



Peneiramento



Propriedades das Partículas - Uniformes

Tamanho característico da partícula obtido por peneiramento – (D) - diâmetro

Características importantes do material podem ser calculadas em função de D:

1. Superfície externa da partícula
2. Volume da partícula
3. Fator de forma
4. Número de partículas na amostra
5. Superfície externa da amostra
6. Superfície específica

Exercício

Uma amostra de pó de mica foi analisada por meio de um estereomicroscópio. As dimensões das partículas foram consideradas uniformes sendo a espessura 0,5 mm, largura 8 mm e comprimento 14,0 mm. Calcular o fator de forma das partículas que são paralelepípedos retângulos.

Propriedades das Partículas – Heterôgeneas

A separação de materiais heterogêneos deve ser feita em frações com partículas uniformes.

Meios de separação:

- decantação
- elutriação
- centrifigação
- peneiramento: meio mais prático. Material passa por uma série de peneiras com malhas progressivamente menores. Cada malha retém uma parte da amostra. Operação conhecida como análise granulométrica.

Propriedades das Partículas – Heterôgeneas

Quando utilizar a análise granulométrica?

- Partículas de diâmetros entre 75 μ m e 4 μ m.

Quando as frações são classificadas a operação passa a se chamar **Classificação Granulométrica**.

Granulometria – termo usado para caracterizar o tamanho de um material (partículas).

Classificação granulométrica – classificação das partículas de acordo com seus diâmetros (tamanho).

Análise granulométrica – sequência de procedimentos de ensaio normatizados que visam determinar a distribuição granulométrica de determinada amostra.

Propriedades das Partículas – Heterôgeneas

Materiais heterogêneos: possuem forma irregular com uma distribuição de forma.

Materiais da mesma forma, mas com tamanhos, diferentes possuem uma distribuição de tamanho.

Exemplo:

Moagem: partículas de forma irregular



Secagem de pasta e líquidos por atomização: forma uniforme, esféricas, com tamanhos variados.



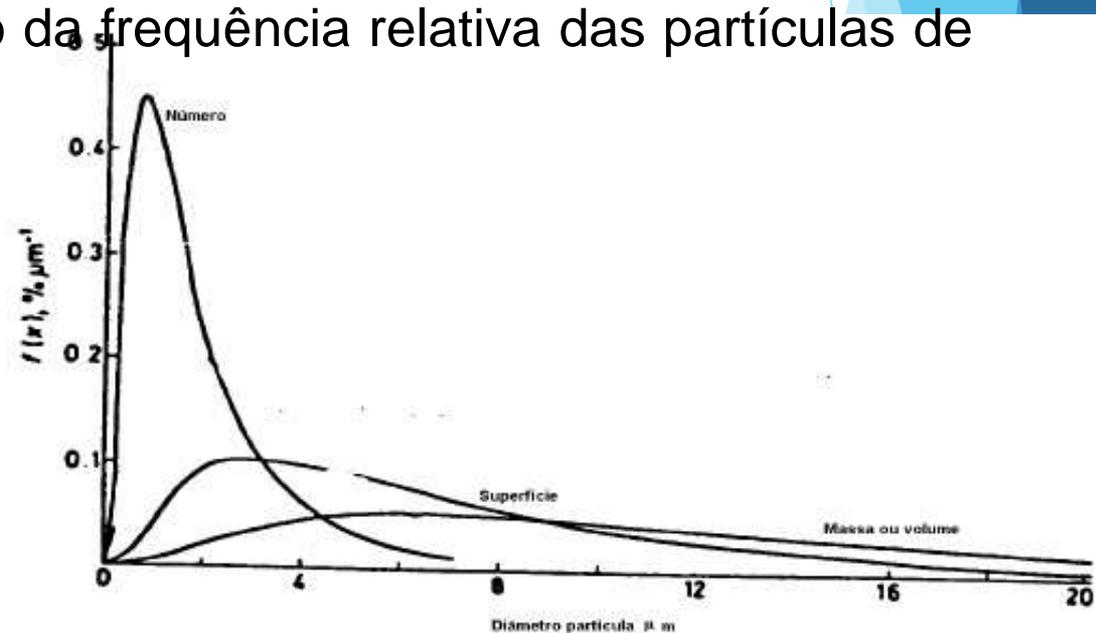
Propriedades das Partículas – Heterôgeneas

Análise de partículas: concentra-se na distribuição de tamanhos. Mesmo que a forma seja irregular, um tamanho equivalente a uma forma esférica pode ser obtido.

Tamanho das partículas e distribuição de tamanhos

Distribuições de tamanhos de partículas de qualquer material sólido pode ser estudada em função da frequência relativa das partículas de um certo D.

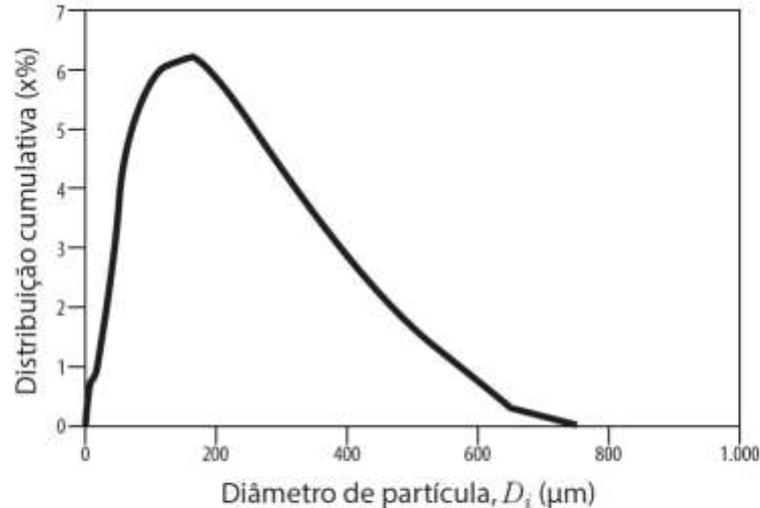
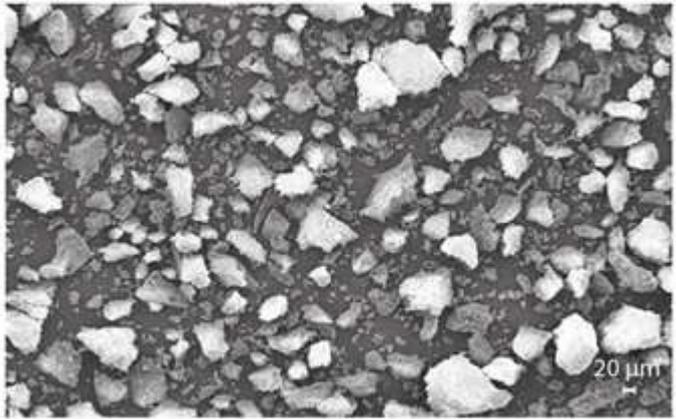
- número,
- massa,
- volume,
- superfície.



Propriedades das Partículas – Heterôgeneas

Distribuição por Número

Definição de diâmetro médio de partícula decorre do conhecimento da distribuição da frequência de tamanhos de uma determinada amostra.



Distribuição de frequência das partículas em função do número.

Propriedades das Partículas – Heterôgeneas

Distribuição por Número – tipos de diâmetros médio

Símbolo	Nome do Diâmetro médio	p	q	ordem
D_L	Linear (aritmético)	0	1	1
D_s	Superfície	0	2	2
D_v	Volume	0	3	3
D_m	Massa	0	3	3
D_{sd}	Superfície-diâmetro	1	2	3
D_{vd}	Volume-diâmetro	1	3	4
D_{vs}	Volume-superfície	2	3	5
D_{ms}	Massa-superfície	3	4	7

Propriedades das Partículas – Heterôgeneas

Distribuição por Número

Estes diâmetros podem ser calculados por:

$$D_{qp}^{q-p} = \frac{\sum d^q \cdot N}{d^p \cdot N}$$

Em que N = número de partículas de 1 amostra

Com $p = 0$ e $q = 1$, tem-se o diâmetro aritmético ou diâmetro médio por número D_L :

$$D_L = \frac{\sum dN}{N}$$

Propriedades das Partículas – Heterôgeneas

Métodos de análises de distribuição de partículas

Método	Faixa aplicação μm	Diâmetro ou Tamanho medido	Tipo de Distribuição
Peneiras	37 – 4000	Diâmetro de peneira	Massa
Microscopia ótica	5 – 120	Diâmetro área projetada Diâmetro Martin .. etc.	Número
Pipeta Andreasen	2 - 100	Diâmetro Stokes	Massa
Absorção de Luz e Sedimentação	2 – 100	Diâmetro Stokes	Massa ou Número
Impactores de Cascata	0,3 – 50	Diâmetro Aerodinâmico	Massa
Absorção Raio X Sedimentação (Sedígrafos)	2– 100	Diâmetro Stokes	Massa
Absorção de Luz e Sedimentação	3 – 100	Diâmetro Stokes	Superfície
Espalhamento de Luz – em gás (contadores)	0.1 – 100	Diâmetro área projetada	Número

A distribuição de tamanho de partículas pode ser feita por diversos tipos de equipamentos, obtendo distribuições por número, massa ou superfície.

Propriedades das Partículas – Heterôgeneas

O diâmetro médio obtido através de distribuição por número difere do obtido por distribuição por massa ou superfície.

Mesmo que as distribuições obtidas sejam do mesmo tipo.

Deve-se procurar a equivalência entre os diâmetros medidos.

Por exemplo, para o estudo de distribuição de tamanho de partículas feita com peneiras e com pipeta de Andreasen tem-se, em ambos os casos, a distribuição por massa, ainda assim os diâmetros medidos são diferentes. Na distribuição por peneiras existe o chamado diâmetro de peneira e na distribuição obtida com a Pipeta de Andreasen tem-se o diâmetro de Stokes, que é medido para uma partícula em escoamento laminar:

$$D_{Stokes} = \left[\frac{18 \cdot v \cdot \mu}{(\rho_s - \rho_f) \cdot g} \right]^{1/2}$$

Propriedades das Partículas – Heterôgeneas

Distribuição por massa

A – Diâmetro de Sauter

$$\bar{D}_{Sauter} = \frac{1}{\sum_{n=1}^i \frac{x_n}{\bar{D}_n}}$$

Sendo:

$$\bar{D}_n = \frac{D_{n-1} + D_n}{2}$$

x_n = Fração de massa retida na abertura da peneira n

D_n = diâmetro de abertura da peneira n

D_{n-1} = diâmetro de abertura da peneira n-1

Propriedades das Partículas – Heterôgeneas

Distribuição por massa

B – Diâmetro médio baseado na superfície (D_{sup}) – sup média entre todas as amostras

$$\bar{D}_{\text{sup}} = \left(\frac{\sum_{n=1}^i \frac{x_n}{D_n}}{\sum_{n=1}^i \frac{x_n}{(\bar{D}_n)^{1/3}}} \right)^{1/2}$$

C – Diâmetro médio baseado em volume (D_{vol}) – vol médio entre todas as amostras

$$\bar{D}_{\text{vol}} = \left(\frac{1}{\sum_{n=1}^i \frac{x_n}{(\bar{D}_n)^3}} \right)^{1/3}$$

Propriedades das Partículas – Heterôgeneas

Área específica de uma amostra de Sólidos (A_w)

É a área por unidade de massa,

Calculada baseada na densidade e na esfericidade das partículas a partir da equação da superfície externa (S).

$$A_w = \frac{6}{\phi \cdot \rho_{ap}} \sum_{n=1}^i \frac{x_n}{D_n} = \frac{\lambda}{\rho_{ap}} \cdot \sum_{n=1}^i \frac{x_n}{D_n}$$

Número de Partículas numa amostra (N): para partícula não uniformes

$$N = \frac{1}{b\rho_{ap}} \cdot \sum \frac{x_n}{D_n^3} = \frac{1}{b\rho_{ap} D_v^3}$$

Propriedades das Partículas – Heterôgeneas

Superfície externa das partículas (S)

Medida para toda a amostra

$$S = \frac{\lambda \cdot M}{\rho_{ap}} \cdot \sum_{n=1}^i \frac{x_n}{\overline{D}_n^3}$$

Análise por peneiramento/ serie de peneiras

Peneiras em serie padronizadas: medir o tamanho e distribuição de tamanhos (76 mm - 38 μ m).

Peneiras: com telas de arame, com dimensões padronizadas.

Aberturas das peneiras: quadradas.

Cada peneira é identificada pela malha em polegada.

As aberturas reais são menores que as aberturas correspondentes ao número das malhas (espessura do arame).

Série Tyler: são as mais comum.

Tyler: baseada na abertura de uma peneira de 200 malhas.

Tyler abertura: 0,074 mm.

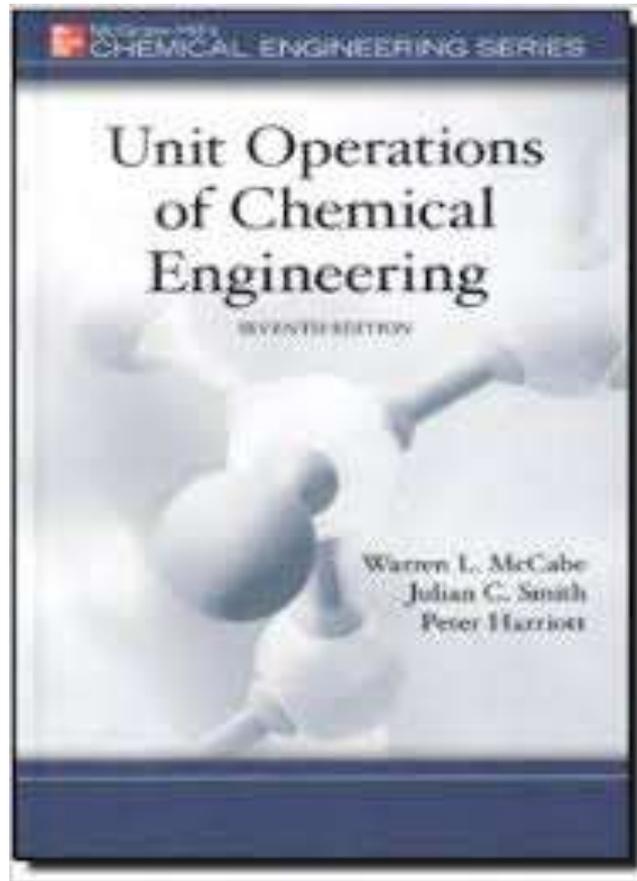
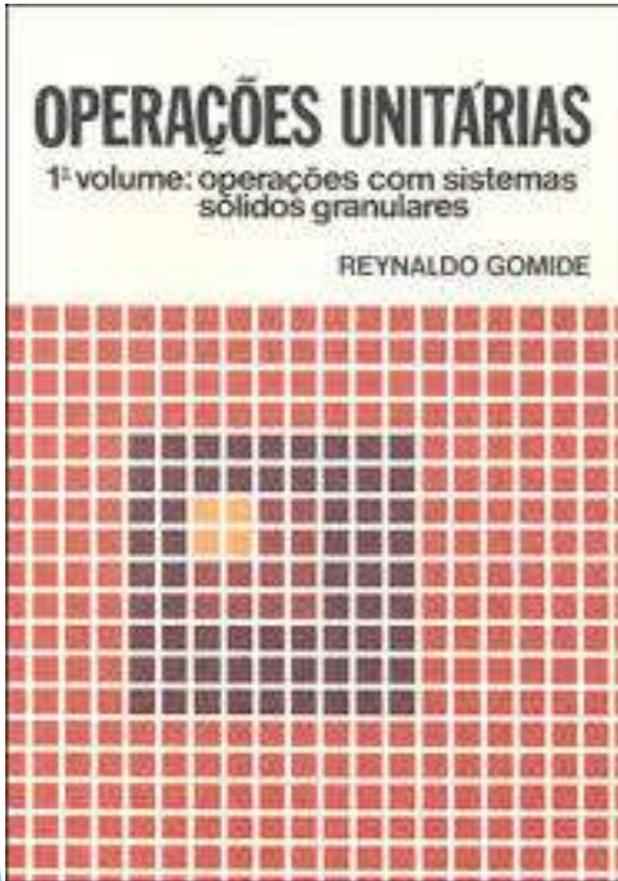
Exercício

Uma análise por peneiramento de quartzo triturado apresenta-se na tabela abaixo. Conhecendo a densidade das partículas 2650 kg/m^3 e os fatores de forma $b= 2$ e $\phi= 0,571$, para um material com tamanho de partícula entre 4 e 200 malhas, calcule:

- A_w
- Diâmetro baseado em volume e Diâmetro de Sauter
- Número de partículas no intervalo de malhas 150/200

Malhas	Abertura da peneira Dpn, mm	Fração de massa retida xn	Diâmetro médio das partículas com o aumento. Dpn,mm	Fração acumulativa inferior a Dpn
4	4.699	0.0000	—	1.0000
6	3.327	0.0251	4.013	0.9749
8	2.362	0.1250	2.845	0.8499
10	1.651	0.3207	2.007	0.5292
14	1.168	0.2570	1.409	0.2722
20	0.833	0.1590	1.001	0.1132
28	0.589	0.0538	0.711	0.0594
35	0.417	0.0210	0.503	0.0384
48	0.295	0.0102	0.356	0.0282
65	0.208	0.0077	0.252	0.0205
100	0.147	0.0058	0.178	0.0147
150	0.104	0.0041	0.126	0.0106
200	0.074	0.0031	0.089	0.0075
Pan	—	0.0075	0.037	0.0000

Bibliografia:



Capítulo V - 7ª Ed.

Capítulo 6 - 1ª Ed.