

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LOQ4085 – OPERAÇÕES UNITÁRIAS I – REVISÃO 2 – ABRIL 2019

PROFESSORA: LÍVIA CHAGURI E CARVALHO

OPERAÇÕES EM SISTEMAS PARTICULADOS

1. Introdução

Os sólidos, em geral, exigem mais complexidade de tratamento nas operações unitárias em relação aos líquidos e gases. Nos diferentes processos industriais, os sólidos apresentam inúmeras aparências, formas angulares, em formato de lâminas e pós de diferentes tamanhos. Ainda podem ser duros e abrasivos, resistentes ou frágeis, coesivos e de fluidez livre ou pegajosa. Independente da forma na qual o sólido se apresenta, é preciso encontrar meios para sua manipulação de forma a preservar ou melhorar suas características físico-químicas no seu processamento.

Nos processos químicos os sólidos, em sua maioria, estão na forma de partículas, portanto, é necessário conhecer as propriedades, modificação e separação dos sólidos na forma de partículas.

2. Escoamento em meios porosos

A necessidade de conhecer as diversas características de um sistema poroso está presente em vários campos da engenharia, portanto, as informações a respeito de um sistema de partículas são fundamentais para o projeto dos equipamentos e simulação dos processos de diversas operações unitárias como: operações de transporte, filtração, sedimentação, centrifugação, fluidização, entre outras.

Nas indústrias existe uma grande diversidade de sistemas porosos, como os diferentes sólidos granulares como por exemplo, bauxita, matérias primas de cimento e seus resíduos, argila, carvão, coque, granito, mineral de ferro, quartzo, passando aos grãos (arroz, feijão, trigo etc), diferentes tipos de farinhas e pós.

As partículas de interesse nas indústrias químicas têm diâmetros de diferentes magnitudes (variando de 1 μm a 15 cm, por exemplo), dado que as operações envolvendo sistemas porosos ocorrem com um grande número de partículas, sua

caracterização por meio de propriedades físicas é fundamental para o adequado dimensionamento do processo.

Os sistemas porosos podem ser caracterizados tanto pela partícula isolada como quando dispostas em conjunto, conhecido como leito de partículas.

3. Caracterização de partículas

Independente do processo, o conhecimento minucioso das propriedades físicas e morfológicas relacionadas à partícula como porosidade, tamanho e distribuição de poros, área superficial e massa específica é de muita importância na compreensão de fenômenos que regem uma determinada operação unitária, além de permitir o aperfeiçoamento de tecnologias envolvendo sistemas particulados.

As partículas individuais são caracterizadas pelo seu tamanho, forma e densidade. As partículas de um sólido homogêneo têm a mesma densidade que o material original, enquanto as partículas obtidas de um sólido heterogêneo têm várias densidades, que diferem do material original.

3.1 Propriedades da partícula

Esfericidade da partícula (ϕ):

A forma de uma partícula isolada pode ser expressa em termos da esfericidade, que é independente do tamanho da partícula. A esfericidade é útil para caracterizar a forma de partículas irregulares e não esféricas, pois para uma partícula esférica de diâmetro D_p , a esfericidade é 1 ($\phi = 1$).

Para uma partícula não esférica, a esfericidade é dada pela relação:

$$\phi = \left| \frac{A_{s,esf}}{A_{SP}} \right| \leq 1 \quad (1)$$

Em que: $A_{s,esf}$ é a área superficial da esfera de igual volume da partícula (m^2); A_{SP} é a área superficial da partícula (m^2) e V é o volume (m^3).

Portanto, de acordo com a equação (1), para esferas $\phi = 1$ e $\phi < 1$ para todos os outros formatos de partícula.

Na Tabela 1 podem ser observados valores de esfericidade para alguns formatos conhecidos de partículas.

Formato de partícula		ϕ
Esfera		1,00
Cubo		0,81
Cilindros*	H/D	0,87
	H=5D	0,70
	H=10D	0,58
	H=D/3	0,76
Discos	H=D/6	0,60
	H=D/10	0,47
Areia de praia		0,86
Areia de rio		0,53
Areia misturada		0,75
Sólidos triturados		0,50-0,70
Partículas granulares		0,70-0,80
Trigo		0,85
Anéis de Rasching**		0,26-0,53

* em que H é a altura e D é o diâmetro do cilindro.

** Anéis de Rasching são cortes que possuem a geometria de tubo.

Exemplo 1. Determine a esfericidade de um cubo de maçã, cujas arestas medem 4 mm.

Diâmetro da partícula:

A medida do diâmetro de uma partícula esférica é facilmente obtida com um instrumento de medição (por exemplo, paquímetro), mas para partículas não esféricas essa propriedade é um pouco mais complicada de se medir. Portanto, define-se o diâmetro equivalente (D_{eq}) e o diâmetro médio da partícula D_p , que são utilizados em escoamentos de leitos, no cálculo de perda de carga e na classificação dos sólidos.

$$D_{eq} = \phi \cdot D_{esf} \quad (2)$$

Em que:

D_{eq} é o diâmetro equivalente (m) e D_{esf} é o diâmetro da esfera (m)

Vários são métodos de determinação do diâmetro equivalente das partículas (D_{eq}), de forma resumida, os métodos mais utilizados são apresentados:

i) Partículas grandes ($D_p > 1 \text{ mm}$): grãos de milho, uvas, soja...

O diâmetro equivalente da partícula é obtido por determinação do volume de uma dada amostra de partículas, com os seguintes métodos:

- a) Pesa número conhecido de partículas, de densidade conhecida e calcula o volume.
- b) Por deslocamento volumétrico: imersão de uma massa conhecida de partículas não porosas em um fluido que não penetre na amostra – peso da partícula no fluido.
- c) Para partículas de geometria definida, mede-se o diâmetro com um micrômetro ou paquímetro e se calcula a média entre as medidas.

ii) Partículas intermediárias ($1 \text{ mm} > D_p > 40 \text{ }\mu\text{m}$):

Diâmetro médio é obtido por meio de sistema de peneiras padronizadas. A determinação das faixas de tamanho das partículas é feito pela série de aberturas de peneiras que mantém entre si uma constante. A abertura de referência mais utilizada é a proposta pela U.S. Tyler Company em que $a_n = a_0 (\sqrt{2})^n$ em que a_n é a abertura de ordem n e a_0 é a abertura de referência, sendo $0,74 \text{ }\mu\text{m}$ para a escala Tyler e 1 mm para a escala Rittinger. As aberturas das peneiras para a escala Tyler foram relacionadas com o número de malhas (*mesh*) que representa o número de aberturas de uma mesma dimensão contido em um comprimento de $25,4 \text{ mm}$. O sistema Tyler pode ser observado na Tabela 2. A determinação do diâmetro médio é feita pela média da abertura de duas peneiras, entre as quais a amostra ficou retida.

Tabela 2. Características da série de peneiras Tyler

APPENDIX 5

Tyler Standard Screen Scale

This screen scale has as its base an opening of 0.0029 in., which is the opening in 200-mesh 0.0021-in. wire, the standard sieve, as adopted by the National Bureau of Standards.

Mesh	Clear opening, in.	Clear opening, mm	Approximate opening, in.	Wire diameter, in.
	1.050	26.67	1	0.148
†	0.883	22.43	$\frac{1}{8}$	0.135
	0.742	18.85	$\frac{1}{16}$	0.135
†	0.624	15.85	$\frac{1}{32}$	0.120
	0.525	13.33	$\frac{1}{64}$	0.105
†	0.441	11.20	$\frac{1}{128}$	0.105
	0.371	9.423	$\frac{1}{256}$	0.092
$2\frac{1}{2}\dagger$	0.312	7.925	$\frac{1}{512}$	0.088
3	0.263	6.680	$\frac{1}{1024}$	0.070
$3\frac{1}{2}\dagger$	0.221	5.613	$\frac{1}{2048}$	0.065
4	0.185	4.699	$\frac{1}{4096}$	0.065
5†	0.156	3.962	$\frac{1}{8192}$	0.044
6	0.131	3.327	$\frac{1}{16384}$	0.036
7†	0.110	2.794	$\frac{1}{32768}$	0.0328
8	0.093	2.362	$\frac{1}{65536}$	0.032
9†	0.078	1.981	$\frac{1}{131072}$	0.033
10	0.065	1.651	$\frac{1}{262144}$	0.035
12†	0.055	1.397		0.028
14	0.046	1.168		0.025
16†	0.0390	0.991		0.0235
20	0.0328	0.833	$\frac{1}{52}$	0.0172
24†	0.0276	0.701		0.0141
28	0.0232	0.589		0.0125
32†	0.0195	0.495		0.0118
35	0.0164	0.417	$\frac{1}{64}$ <None>	0.0122
42†	0.0138	0.351		0.0100
48	0.0116	0.295		0.0092
60†	0.0097	0.246		0.0070
65	0.0082	0.208		0.0072
80†	0.0069	0.175		0.0056
100	0.0058	0.147		0.0042
115†	0.0049	0.124		0.0038
150	0.0041	0.104		0.0026
170†	0.0035	0.088		0.0024
200	0.0029	0.074		0.0021
270	0.0021	0.053		
325	0.0017	0.044		

[†]These screens, for closer sizing, are inserted between the sizes usually considered as the standard series. With the inclusion of these screens the ratio of diameters of openings in two successive screens is as $1 : \sqrt[4]{2}$ instead of $1 : \sqrt{2}$.

Fonte: McCabe et al., 2007.

Na Tabela 2 algumas peneiras têm o intervalo de peneiramento mais estreito (como por exemplo, as peneiras Mesh marcadas com um símbolo). Com esta inclusão, a relação dos diâmetros de aberturas entre as duas peneiras sucessivas é de $\sqrt[4]{2}$ em vez de $\sqrt{2}$.

iii) Partículas pequenas (<40 µm):

São utilizados métodos indiretos, como a sedimentação, ou métodos microscópicos e de difração a laser.

iv) Partículas com distribuição de tamanho – partículas que não tem tamanho uniforme – cereais, amido, areia

É necessário medir um grande número de partículas e obter uma descrição da distribuição do seu tamanho.

Métodos: peneiramento (Tyler), métodos microscópicos.

Número de partículas

Dada uma massa (m) de partículas, de densidade ρ_s e volume V_p , o número total de partículas (N) pode ser calculado como:

$$N = \frac{\text{massa total}}{\text{massa de cada partícula}}$$

Exemplo 2. Determine o diâmetro equivalente de uma partícula isolada de uma amostra com 20 partículas cúbicas de coco. A densidade do coco, obtida em laboratório, é de 996,33 kg/m³ e a massa das 20 partículas é de 1,224g.

Densidade

A densidade de um material é definida como a massa desse material dividida pelo volume ocupado por ele. As diferentes definições de densidade são provenientes de como o volume da partícula é considerado. O volume visível de uma amostra é composto pelo volume da matriz sólida e pelo volume de vazios (poros). A massa do material é facilmente determinada por uma balança analítica, enquanto o volume, em se tratando de sólidos com geometria conhecida, é calculado diretamente da definição de seu volume geométrico.

Portanto, para partículas, são definidas as seguintes densidades:

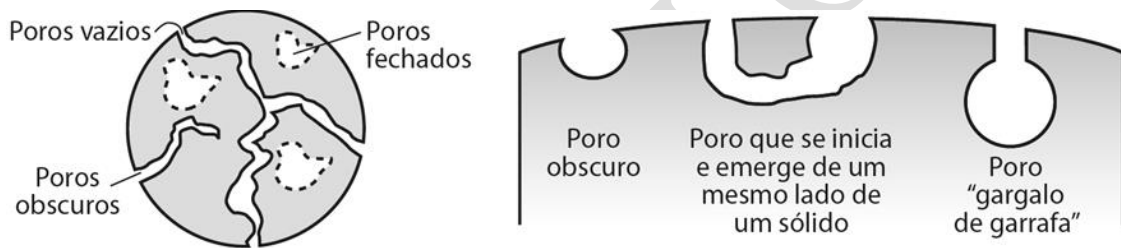
- Densidade real (ρ_s);
- Densidade da partícula (ρ_p);
- Densidade aparente (ρ_{ap}).

Densidade real ou da substância (ρ_s):

É a razão entre a massa da partícula e seu volume, após exclusão dos poros, portanto, apenas é considerado o volume do material.

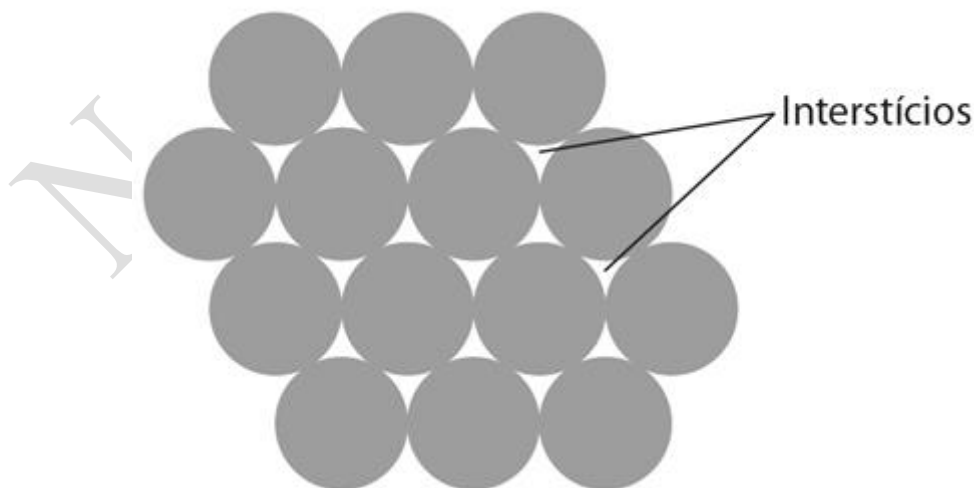
$$\rho_s = \frac{m_p}{\text{Volume excluindo os poros}} \quad (3)$$

Um material é dito poroso, quando é possível encontrar uma passagem contínua de um lado para outro. Os poros podem ser fechados, fechados em apenas uma extremidade e abertos ou vazios, conforme ilustrado na Figura 1. Os poros fechados não contribuem para os fenômenos de transporte de matéria ou energia. Se os poros abertos estiverem entre as partículas, eles serão denominados poros interpartículas, espaços entre as partículas de um pó, por exemplo, conforme pode ser observado na Figura 2.



Fonte: Cremasco, 2009.

Figura 1. Classificação dos poros segundo Webb & Orr, 1977.



Fonte: Cremasco, 2009.

Figura 2. Representação da porosidade de um pó.

Densidade da partícula (ρ_p):

É a razão entre a massa da partícula que não teve sua estrutura modificada pelo seu volume, que é a soma dos volumes do sólido e dos poros fechados, ou seja, o volume de vazios interconectados externamente a partícula não são considerados:

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (4)$$

Quando o material em questão for pequeno o suficiente de modo a ser praticamente impossível medir seu diâmetro, e que, em vez de uma partícula, tenha-se uma amostra desse material (ou seja, um número considerável de partículas) a técnica de picnometria ou método de Arquimedes pode ser utilizado. Esta técnica consiste na imersão da amostra de partículas em um recipiente preenchido por um líquido (mercúrio, tolueno, heptano); o volume ocupado pela amostra em tal recipiente. Um roteiro para a determinação da densidade da partícula é:

- a) Considerar uma amostra de massa conhecida m_1 ;
- b) Com um picnômetro de volume conhecido, adiciona-se o líquido (pode ser água também) medindo a massa do conjunto (massa do picnômetro + massa água), a massa desse conjunto é denominada m_2 ;
- c) Ao conjunto m_2 adiciona-se m_1 e pesa-se o conjunto (massa do picnômetro + massa água + massa de amostra), denominando m_3 . Portanto, a massa de água deslocada é: $m_{\text{água}} = m_1 + m_2 - m_3$.

O volume de água deslocada será igual ao volume da partícula.

Densidade aparente (ρ_{ap}):

É a densidade de uma substância, incluindo os poros remanescentes no material, ou seja:

$$\rho_{ap} = \frac{m_p}{V_{\text{olumentotal}}} \quad (5)$$

Por exemplo, considerando uma partícula de esfera de carvão, altamente porosa, cujo valor do diâmetro pode ser obtido com um paquímetro. A massa da partícula é obtida por meio de uma balança e dividindo a mesma pelo volume pelo volume da partícula, considerando seu diâmetro, a densidade aparente é então obtida.

Pode-se observar ainda que o valor da densidade real é maior que o valor da densidade aparente, estes valores serão aproximadamente iguais em caso de partículas de baixa porosidade.

A determinação da densidade aparente é dada pela inserção da amostra em recipiente de volume conhecido, de modo que a quantidade de amostra que excede os limites do recipiente possa ser removida com uma régua. Considera poros das partículas e poros entre as partículas.

Porosidade (ϵ):

A porosidade aparente da partícula (ϵ_{ap}) é a razão entre o ar total ou espaços vazios e o volume total do material:

$$\epsilon_{ap} = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_s} \quad (6)$$

Portanto, tanto a porosidade de uma única partícula como a porosidade de um pó, podem ser definidas pela razão entre o volume de poros abertos, pelo volume total da partícula.

Note que a porosidade também pode ter diferentes significados, de acordo com a determinação do volume. Portanto, são definidas a porosidade aparente da partícula (ϵ_{ap}) e porosidade do poro fechado (ϵ_{CP}).

A porosidade de poro fechado é a fração volumétrica dos poros fechados dentro do material e não conectados com o exterior:

$$\epsilon_{CP} = 1 - \frac{\rho_p}{\rho_s} \quad (7)$$

Dependendo do tipo do meio porosos, o valor da porosidade pode variar da unidade até um valor bem próximo a zero. Metais e pedras vulcânicas, por exemplo, possuem porosidades muito baixas, já os filtros fibrosos e isolantes térmicos são matérias bastante porosos. Desta forma, os poros podem ser classificados por tamanho, esta classificação pode ser verificada na Tabela 3.

Tabela 3. Classificação do tamanho dos poros (Cremasco, 2009).

Tipos de poros	Tamanho de poros
Macroporos	Maior que 50 nm
Mesoporos	Entre 2 e 50 nm
Microporos	Entre 0,6 e 2 nm
Ultramicroporos	Menor que 0,6 nm

Exemplo 3. Maça desidratada teve seu volume determinado em laboratório conforme descrito a seguir: uma amostra pulverizada foi inserida em um picnômetro de 50 mL, previamente calibrado com água; essa amostra teve sua massa determinada em balança semi analítica ($m_1 = 74,6$ g). Outra amostra de maça desidratada íntegra foi introduzida em um cilindro graduado até atingir o volume de 600 mL e também teve sua massa determinada na balança ($m_2 = 599,4$ g).

Determine:

- Densidade real da maça desidratada
- A densidade aparente
- Porosidade aparente

Área Superficial específica (a_s):

Medida muito utilizada nas operações unitárias de escoamento de fluidos: secagem, filtração, extração sólido-líquido entre outras.

É definida como a razão entre a área superficial da partícula (A_{SP}) e seu volume (V_p):

$$a_s = \frac{A_{SP}}{V_p} \quad (8)$$

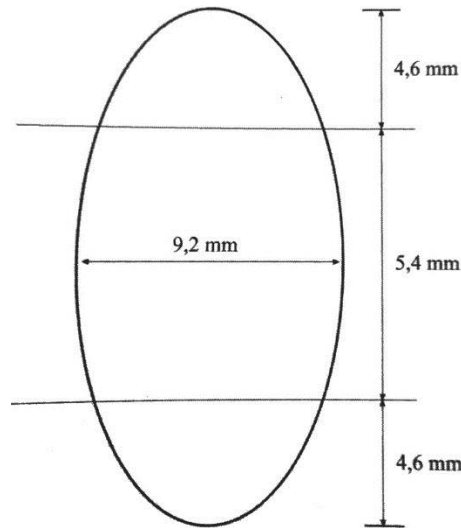
Em que a_s área superficial específica por unidade de volume (m^2/m^3); A_{SP} é a área superficial da partícula (m^2); V_p é o volume da partícula (m^3)

No caso de uma partícula esférica, com diâmetro D_p , a área superficial específica é:

$$a_s = \frac{A_{SP}}{V_p} = \frac{6\pi D_p^2}{\pi D_p^3} = \frac{6}{D_p} \quad (9)$$

Exemplo 4.

Determine a área superficial específica de azeitonas, cujas dimensões são: 14,6 mm de altura e 9,2 mm de diâmetro, conforme esquema representado na figura:



Tamanho de partículas:

A técnica para medir o tamanho de uma partícula homogênea (uniforme), é bastante simples, basta medir seu diâmetro utilizando um paquímetro. O mesmo não acontece quando se deseja obter um diâmetro de partícula representativo de uma amostra heterogênea, neste caso, diferentes métodos podem ser utilizados para obter a distribuição de tamanho de partículas. Entre eles, os métodos de peneiramento através da série de peneiras Tyler; métodos microscópicos, em que programas computacionais acoplados ao microscópio possibilitam a captura de imagens e a medida das partículas; e métodos de difração a laser que funcionam com um sistema ótico em um ou mais feixes de luz, possibilitando medir a distribuição precisa do tamanho de partículas. No caso da utilização da série de peneiras Tyler a equação (3) é utilizada para obter o diâmetro médio das partículas.

$$\overline{D}_p = \frac{1}{\sum_i \frac{X_n}{a_n}} \quad (10)$$

Em que X_n é a fração mássica retida na peneira n (kg/kg total); e $\overline{a_n}$ é a média entre a abertura de duas peneiras (mm).

Diâmetro da partícula em que a área superficial é igual à média das áreas superficiais de todas as partículas presentes em uma certa amostra:

$$\overline{D_p} = \sqrt[2]{\frac{\sum_{n=1}^n \left(\frac{X_n}{a_n} \right)}{\sum_{n=1}^n \left(\frac{X_n}{a_n^3} \right)}} \quad (10-1)$$

Diâmetro da partícula cujo volume é igual ao volume médio de todas as partículas presentes em uma amostra:

$$\overline{D_p} = \sqrt[3]{\frac{1}{\sum_{n=1}^n \left(\frac{X_n}{a_n^3} \right)}} \quad (10-2)$$

Relação entre D_{eq} e D_p (Kunii e Levenspil (1991))

i) Partículas irregulares, que não são aparentemente compridas nem curtas (semente de goiaba e coco ralado):

$$D_{eq} = \phi D_{esf} \cong \phi D_p \quad (11)$$

ii) Partículas irregulares, com dimensão mais comprida, com razão longitudinal não superior a 2:1 (ovos, azeitona, amendoins):

$$D_{eq} = \phi D_{esf} \cong \phi D_p \quad (12)$$

iii) Partículas irregulares, com dimensão mais curta, com razão longitudinal não superior a 1:2 (semente de laranja e milho):

$$D_{eq} = \phi D_{esf} \cong \phi^2 D_p \quad (13)$$

3.2 Peneiramento

No caso de peneiramento, a base de representação da distribuição de tamanho de partícula é a massa de partícula, mais especificamente pela fração mássica, na qual a distribuição de tamanho de partículas é associada à fração mássica dentro de cada

intervalo de tamanho. A técnica de peneiramento consiste em passar uma quantidade de material através de uma série de peneiras padronizadas, conforme ilustrado na Figura 3, pesando o material retido em cada peneira. Quando uma certa quantidade de amostra é alimentada na primeira peneira, uma certa quantidade de material poderá ou não ficar retida, enquanto boa parte a atravessa e se deposita na segunda peneira, a qual, por sua vez, poderá reter uma certa quantidade de material proveniente da primeira peneira, enquanto outra parte atravessará a segunda peneira, para alimentar a terceira peneira, e assim sucessivamente. Na base do conjunto de peneiras encaixa-se uma peneira "cega", denominada "panela", destinada a receber as partículas menores que atravessaram toda a coluna sem serem retidos em nenhuma das peneiras. Trata-se de um processo passo a passo, em que as barreiras são constituídas pelos fios da malha de cada peneira.

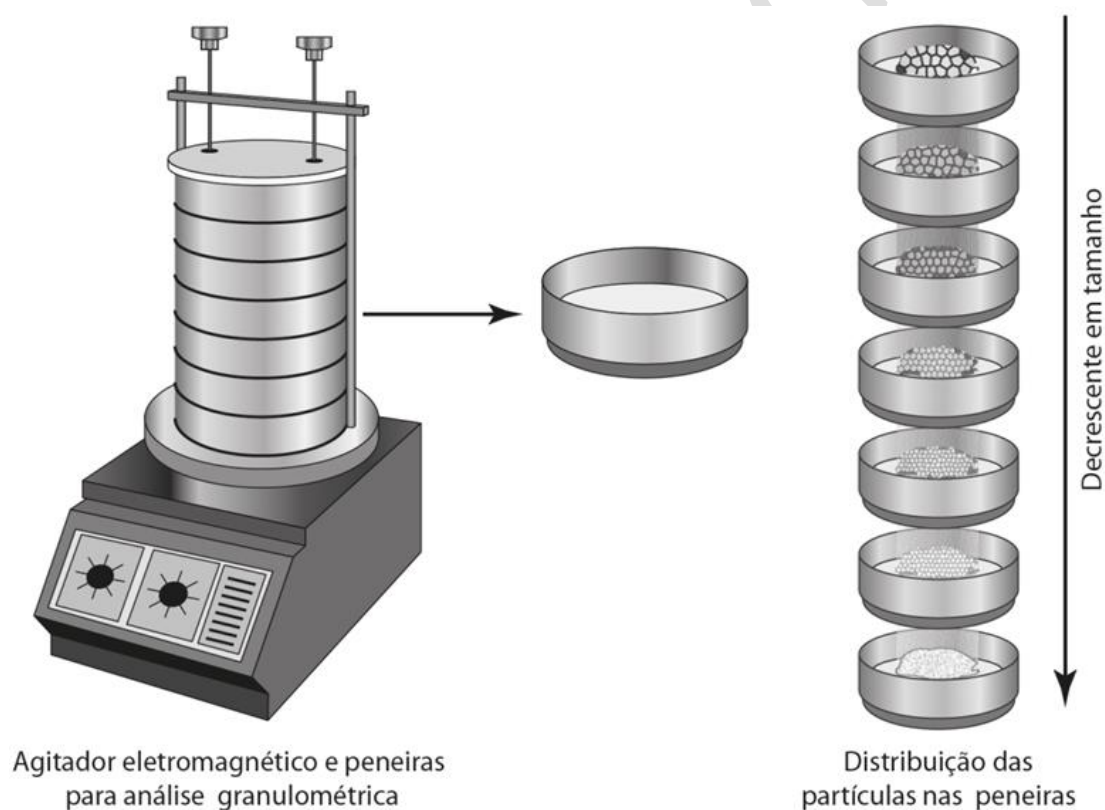


Figura 3. Representação de conjunto de peneiras em escala de laboratório. *Fonte: Cremasco, 2009.*

3.3 Análise granulométrica

A análise granulométrica é definida pela sequência de procedimentos de ensaio normatizados que visam determinar a distribuição granulométrica de determinada amostra.

Já a classificação granulométrica é definida como classificação das partículas de acordo com seus diâmetros (tamanho).

A granulometria é o termo usado para caracterizar o tamanho de um material (partículas).

Em uma análise granulométrica, o operador poderá se referir a ela em termos de diâmetro máximo e o mínimo (abertura da maior e da menor peneira em análise), diâmetro médio (média aritmética das aberturas das peneiras em análise), dimensão máxima característica (abertura da malha cuja porcentagem retida acumulada é igual ou imediatamente inferior a 5% em massa). As dimensões de tais aberturas podem ser dadas em milímetro ou em *mesh*. Mesh, por definição é o número de abertura por polegada linear. A relação entre milímetro (μm) e mesh, pode ser observada na Tabela 4, segundo padronização estabelecida pela *International Standard Organization*, segundo o sistema Tyler, um dos mais utilizados no Brasil.

Tabela 4. Relação entre a abertura em *mesh* e em μm .

Mesh	μm	Mesh	μm
10	2.000	60	250
12	1.680	70	210
14	1.410	80	177
16	1.190	100	149
18	1.000	120	125
20	841	140	105
25	707	170	88
30	595	200	74
35	500	230	63
40	420	270	53
45	354	325	44
50	297	400	37

Uma vez os sólidos analisados utilizando o sistema Tyler, sua classificação segundo a abertura da peneira pode ser observada na Tabela 5.

Tabela 5. Classificação dos sólidos de acordo com o sistema Tyler (Cremasco, 2009).

Tipo de sólidos	Abertura das malhas
Sólidos grosseiros	abaixo de 4 <i>mesh</i> ($> 4.750 \mu\text{m}$)
Finos	de 4 <i>mesh</i> a 48 <i>mesh</i> ($300 - 4.750 \mu\text{m}$)
Ultrafinos	48 a 400 <i>mesh</i> ($38 - 300 \mu\text{m}$)

Exemplo 5: Dados de partículas de bagaço de cana em um sistema de peneiras Tyler foram obtidos e os resultados da massa retida em cada peneira, bem como a respectiva fração mássica, estão apresentados na tabela abaixo. Determine o diâmetro médio das partículas.

Nº DA PENEIRA	$\bar{a}_n$ [mm]	m [g]	X_n [g · g ⁻¹ total]	Nº DA PENEIRA	$\bar{a}_n$ [mm]	m [g]	X_n [g · g ⁻¹ total]
3 ^{1/2} - 10	3,6320	49,80	0,116	35 - 48	0,3560	47,30	0,110
10 - 14	1,4095	23,65	0,055	48 - 65	0,2515	24,50	0,057
14 - 20	1,0005	87,72	0,207	65 - 100	0,1775	8,60	0,020
20 - 28	0,7110	98,56	0,229	100 - 150	0,1255	3,44	0,008
28 - 35	0,5030	82,99	0,193	150 - 200	0,0890	2,15	0,005

Curvas de distribuição de tamanho

A distribuição estatística de tamanhos ou granulometria é expressa usualmente na forma de frequência relativa das partículas que detêm certo diâmetro (Figura 4a), as curvas da fração cumulativa de partículas que possuem diâmetro menor e maior que um valor médio de partícula em um intervalo de 0 a 100%, também são utilizadas (Figura 4b).

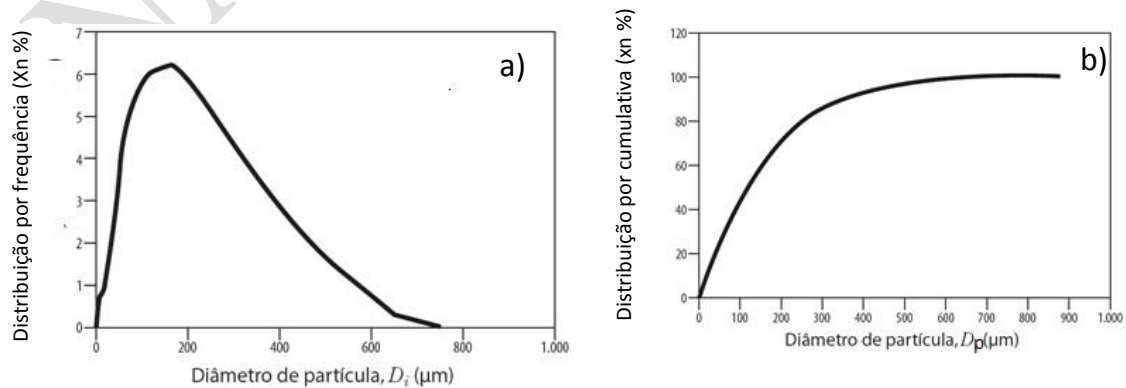


Figura 4. a) Distribuição de frequência b) distribuição cumulativa.

Exemplo 6. Um profissional foi convocado para projetar um reator do tipo leito fluidizado, destinado ao craqueamento catalítico de petróleo. Para tanto, a primeira informação a ser obtida sobre o projeto refere-se à caracterização do particulado. A classificação do particulado de FCC foi conduzida por meio de peneiramento de uma amostra de 100 g de partículas, cujo resultado está apresentado na tabela. Construa os gráficos para a distribuição de frequência e para a distribuição granulométrica da amostra.

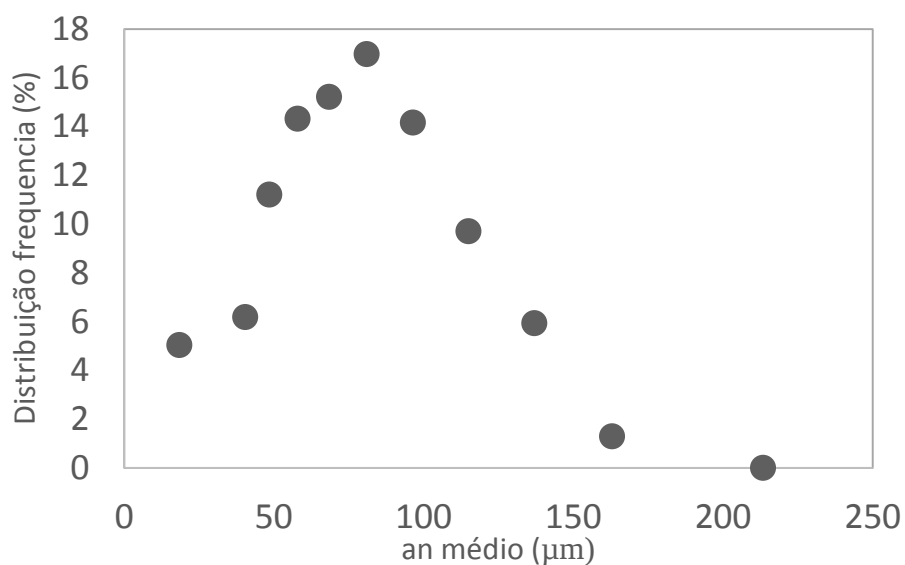
Peneiras (Mesh)	Xn (100%)
-65+80	0
-80+100	1,29
-100+120	5,93
-120+140	9,70
-140+170	14,16
-170+200	16,97
-200+230	15,21
-230+270	14,32
-270+325	11,21
-325+400	6,18
-400	5,03

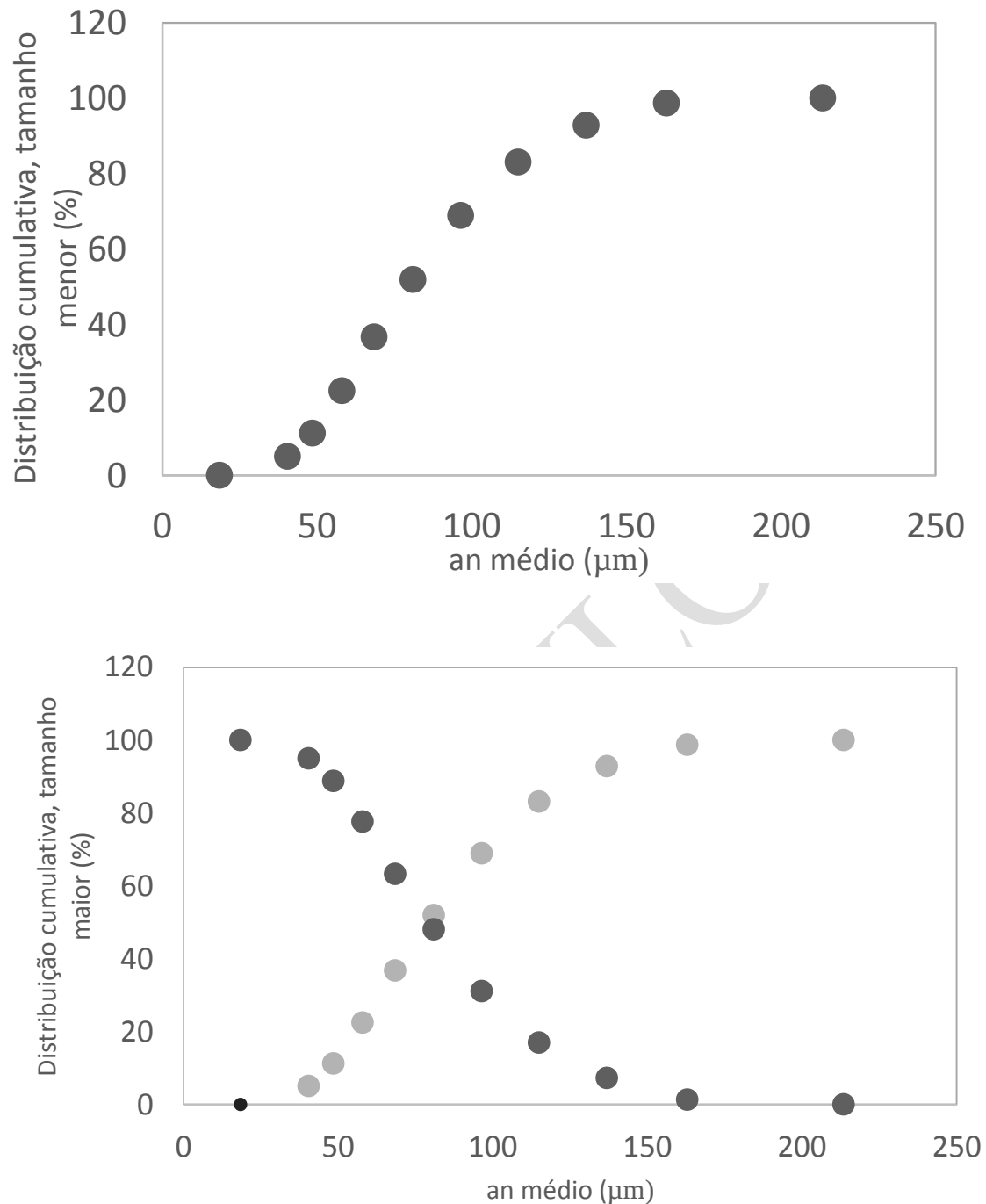
Peneira - Mesh	Diâmetro de abertura (µm)
70	250
80	177
100	149
120	125
140	105
170	88
200	74
230	63
270	53
325	44
400	fundo

Resolução:

Com os dados da tabela acima, constrói-se a tabela com os dados da segunda coluna os resultados de fração de massa retida em cada peneira (X_n), a terceira coluna representa o percentual da massa total que atravessa a peneira ($\#n$). Essa coluna representa a distribuição cumulativa, em que cada valor de x_n indica a fração em massa das partículas menores que um certo diâmetro a_n . A quarta e quinta colunas correspondem aos diâmetros máximo e mínimo em cada intervalo e a sexta coluna representa o diâmetro médio de cada intervalo de peneira.

Peneiras (Mesh)	X_n (100%)	x_n (100%)	$-a_n(\mu m)$	$+a_n(\mu m)$	$a_n(\mu m)$
-70+80	0	100	210	177	193,5
-80+100	1,29	98,71	177	149	163
-100+120	5,93	92,78	149	125	137
-120+140	9,7	83,08	125	105	115
-140+170	14,16	68,92	105	88	96,5
-170+200	16,97	51,95	88	74	81
-200+230	15,21	36,74	74	63	68,5
-230+270	14,32	22,42	63	53	58
-270+325	11,21	11,21	53	44	48,5
-325+400	6,18	5,03	44	37	40,5
-400	5,03	0	fundo	fundo	0





Exemplo 7. Considere o enunciado apresentado no Exemplo 6 e obtenha:

- O valor do diâmetro de Sauter;
- O valor do diâmetro médio da partícula cujo volume é igual ao volume médio das partículas presentes na amostra;
- O valor do diâmetro médio de partícula em que a área superficial é igual à média das partículas presentes nas amostras.

Modelos de distribuição granulométrica

As propriedades dos particulados dependem de sua granulometria. O conhecimento do tamanho das partículas é importante para, entre outros aspectos, determinar sua manipulação e tratamento.

Na prática, nos processos industriais, existe uma grande quantidade de partículas não uniformes, portanto é importante conhecer o comportamento do particulado. Isso implica na necessidade de conhecer a distribuição de tamanho de partículas, portanto é preciso determinar os diâmetros *médios* que possam representar o comportamento de todos os tamanhos do material particulado.

Existem muitas distribuições de tamanhos de partículas que podem descrever o material particulado, como por exemplo, a distribuição de Gates-Gaudin-Schuhmann e Rosin-Rammler-Bennet.

Distribuição de Gates-Gaudin-Schuhmann

O modelo de distribuição do tamanho de partículas conhecido por GGS é representado por:

$$X_f = \left(\frac{a_n}{K_{GGS}} \right)^{I_{GGS}} \quad (14)$$

Em que X_f é a fração mássica do material mais fino do que a abertura da peneira (kg/kg total); a_n é a abertura da peneira de ordem n (m); K_{GGS} é o parâmetro que representa o tamanho médio das partículas (m); I_{GGS} é o parâmetro que representa a dispersão (adimensional), derivada de Schuhmann.

Distribuição de Rosin-Rammler-Bennet

O modelo de distribuição do tamanho de partículas conhecido como RRB é representado por:

$$X_f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{a_n}{K_{RRB}} \right)^{I_{RRB}} \right] \quad (15)$$

Em que K_{RRB} é o parâmetro que representa o tamanho médio das partículas (m); I_{RRB} é o parâmetro que representa a dispersão (adimensional).

Exemplo 8. Analise os dados de distribuição de tamanho de um sistema particulado da tabela abaixo. Verifique qual o melhor ajuste dos dados experimentais pode ser obtido linearizando as equações dos modelos de GGS e RRB.

Peneira (Mesh)	a_n (µm)	Massa retida (g)
20	833	-
28	589	0,03
35	417	0,46
48	295	1,23
65	208	0,63
100	147	0,12
150	104	0,02
Fundo	-	0,01

Bibliografia:

- 1) CREMASCO, M.A. Operações Unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. Blucher, 423p. 2012;
- 2) FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. 2ed. Princípios das operações unitárias. Rio de Janeiro: Guanabara Dois/LTC, 670p. 2008;
- 3) GEANKOPLIS, C. J. Transport Processes and Separation Process Principles. 4ed. New York: Prentice Hall, 1026p. 2010;
- 4) MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. Unit operations of chemical engineering. 7ed. Boston: McGraw-Hill, 1140 p. 2005;
- 5) PERRY's chemical engineers handbook. Editor in Chief Don W. Green; Late Editor Robert H. Perry New York: McGraw-Hill, 2008.
- 6) TADINI, C. Telis, V.R.; Meirelles, A.J.A.; Pessoa, P.A. Operações Unitárias na indústria de alimentos. v1 1. ed. – Rio de Janeiro : LTC, 2016.