



C A P Í T U L O 1

PENEIRAMENTO

Fabiola Dias da Silva Curbelo

Iara Caroline Assunção Dorigon

João Pedro Gonçalves de Souza Soares

Maria Eduarda Araújo Pessoa

Rafael Peixoto Alves

Ted Johnson Vasconcelos Leitão

1. INTRODUÇÃO

A operação de peneiramento é um processo de separação física muito utilizado em várias indústrias, tais como química, alimentícia, farmacêutica, mineração e construção civil. Para isso, o material heterogêneo, com tamanhos variados de partículas, deverá ser separado em frações homogêneas para se obter uma distribuição granulométrica (Geankoplis, 2003; McCabe; Smith; Harriott, 2005).

A importância do peneiramento vai muito além da simples separação de sólidos com base no tamanho das partículas. Essa operação exerce influência direta na eficiência e no desempenho de diversos processos subsequentes, como adsorção, filtração e extração. Todos esses processos são altamente sensíveis à faixa granulométrica do material utilizado, o que torna o peneiramento essencial para garantir a uniformidade do sistema e, consequentemente, a qualidade do produto (Perry; Green, 2018; Allen, 1997).

A área superficial de um material particulado está diretamente relacionada ao diâmetro médio de suas partículas. Quanto menores as partículas, maior será a área superficial disponível, o que favorece diversas operações, como adsorção, secagem, extração, filtração e reações químicas. Nesses casos, é fundamental realizar um estudo detalhado da relação entre o tamanho das partículas e o rendimento do processo, a fim de identificar as condições operacionais mais adequadas para maximizar a eficiência do sistema em análise (Mujumdar, 2014).

Existem diversos métodos para determinar a distribuição do tamanho de partículas, como peneiramento, sedimentação, difração a laser, microscopia óptica e espalhamento dinâmico de luz (também conhecido por DLS - *Dynamic Light Scattering*) (Allen, 1997; Perry; Green, 2018). A Tabela 1 mostra algumas características destes métodos.

Método	Faixa típica	Melhor aplicação
Peneiramento	40 mm – 125 mm (seco) Até 100 mm (úmido)	Materiais granulares. Materiais finos.
Sedimentação	1 mm – 100 mm	Partículas finas em líquidos.
Difração a laser	0,1 mm – 3 mm	Análise de ampla faixa.
Microscopia	< 0,1 mm – 1 mm	Análise detalhada da forma.
DLS	1 nm - 1 mm	Nanopartículas e biomoléculas.

Tabela 1. Características de alguns métodos de separação por tamanho de partículas.

O peneiramento, especificamente, é um processo de separação mecânica que pode ser realizado por via seca ou úmida. O peneiramento a seco é usado quando o material está seco e não há risco de geração de poeira ou aglomeração, sendo mais comum para materiais granulados de média a grossa granulometria. O peneiramento por via úmida é usado quando há partículas finas, menores que 100 mm, com tendência à aglomeração ou quando o processo exige controle de poeira. Neste caso, é possível utilizar água para dispersar as partículas e melhorar a eficiência da separação.

A operação é baseada na passagem do material particulado por peneiras confeccionadas com tela de abertura de malha controlada, ou seja, com abertura conhecida (Figura 1). Este processo apresenta vantagens como operação simples e baixo custo, alta capacidade de processamento em operações contínuas, boa reprodutibilidade e sem necessidade de reagentes químicos.



Figura 1. Peneiras com diferentes granulometrias (malhas).

A análise granulométrica por peneiramento de um material particulado consiste na determinação do tamanho das partículas sólidas, assim como da frequência com que as partículas ocorrem em uma determinada classe ou faixa de tamanho. Para isto, é preciso passar o material a ser analisado por uma série de peneiras com malhas progressivamente menores, onde cada uma retém uma parte da amostra (Figura 2).

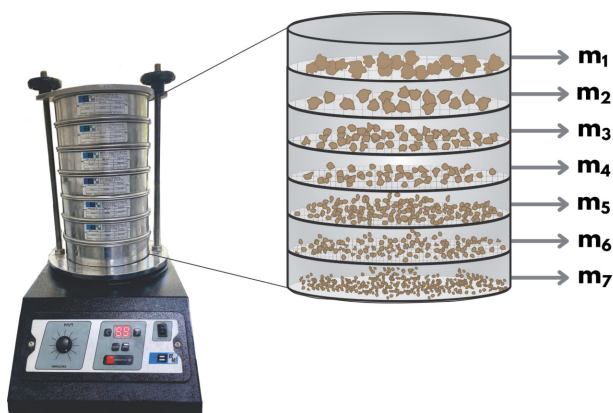


Figura 2. Peneiras de diferentes granulometrias acopladas à mesa vibratória.

Cada fração é relacionada a duas peneiras, uma em que certa quantidade de material passa, denominada de fração passante (finos), e outra em que fica retida, denominada de fração retida (grossos). As quantidades retidas nas diversas peneiras são determinadas por pesagem e as respectivas frações retidas são calculadas dividindo-se a massa retida em cada peneira pela massa total da amostra (Equação 1).

$$\text{Fração retida} = x_i = \frac{m_i}{M} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: x_i é a fração mássica retida (%), m_i é a massa retida na peneira (g) e M é a massa total da amostra (g).

O diâmetro médio das partículas de cada faixa granulométrica é determinado pela média aritmética das peneiras da faixa, conforme Equação 2.

$$\bar{D}_{faixa} = \frac{d_i + d_{i-1}}{2} \quad (\text{Equação 2})$$

Com os resultados do peneiramento, a partir da análise granulométrica, faz-se a representação dos resultados graficamente na forma diferencial ou análise por frequência; na forma acumulativa dos incrementos, expressando a fração acumulada de grossos (FAG) e fração acumulada de finos (FAF); e na forma de histograma.

Faz-se, também, a caracterização do material heterogêneo, através do calcula-se do número de partículas da amostra, da área superficial, da superfície específica, assim como de algumas médias definidas para materiais constituído de partículas irregulares, como diâmetro médio aritmético, muito utilizado na filtração; diâmetro médio superficial, apropriado para o estudo do escoamento de fluidos através de meios porosos; diâmetro médio volumétrico, importante para o controle de qualidade de materiais pulverulentos; diâmetro médio de Sauter, utilizado em cinética e catálise no estudo de transferência de massa e de reações químicas; e a média linear dos diâmetros, importante no estudo da evaporação de gotículas no seio de gases.

Características de materiais heterogêneos a partir da análise granulométrica

Cálculo do número de partículas:

O cálculo do número de partículas, a partir dos dados da análise diferencial, pode ser feito através da Equação 3 (McCabe; Smith; Harriott, 2005; Geankoplis, 2003).

$$N_i = \sum_i^n \frac{m}{\rho_s} \frac{x_i}{C_i D_i^3} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: N é o número total de partículas (adimensional); m é a massa da amostra (g); ρ é a massa específica (g/cm³); x é a fração mássica (adimensional), C é o fator de forma, sendo $\pi/6$ para partículas esféricas e D é o diâmetro médio (cm). Se C e ρ_s forem considerados constantes para todas as frações da amostra, tem-se:

$$N_i = \frac{m}{\rho_s C} \sum_i^n \frac{x_i}{D_i^3}$$

Na Equação 3, o somatório corresponde a todas as frações da amostra, inclusive a amostra da bandeja. E ela vale, igualmente, para uma parte da amostra, desde que se mudem os limites do somatório. Por exemplo, para as frações retidas entre as peneiras "L" e "K" (inclusive), tem-se:

$$N_{L,K} = \frac{m}{\rho_s C} \sum_L^K \frac{x_i}{D_i^3}$$

O número de partículas de uma análise granulométrica fornece uma compreensão mais detalhada do comportamento do material particulado, especialmente quando as propriedades de interesse não dependem apenas da massa ou do volume, e sim da quantidade absoluta de partículas presentes.

Em operações como adsorção, catálise heterogênea, reações químicas de superfície e troca iônica, o número de partículas afeta a quantidade de área superficial disponível, que é proporcional ao número de partículas, considerando um tamanho fixo.

No caso de emulsões, suspensões ou dispersões coloidais, o número de partículas influencia diretamente na viscosidade, na estabilidade da suspensão e na taxa de sedimentação. E, mesmo que esteja com a mesma massa, suspensões com partículas menores têm mais partículas o que acarreta numa maior interação entre elas. Além disso, uma suspensão pode ter mais partículas de tamanho menor do que outra, e, com isso, apresentar diferenças no comportamento mecânico, químico ou físico, que só será entendido ao comparar o número real de partículas. Desta forma, verifica-se que massas iguais não significam, obrigatoriamente, em comportamentos iguais.

Cálculo da área superficial das partículas:

O cálculo da área superficial das partículas (S), a partir dos dados da análise diferencial, pode ser feito através da Equação 4 (Allen, 1997; Geankoplis, 2003).

$$S = \lambda \frac{m}{\rho_s} \sum_i^n \frac{x_i}{D_i} \quad (\text{Equação 4})$$

O cálculo da área superficial das partículas é muito importante em catálise, em reações heterogêneas, como sólido – líquido ou sólido – gás, que ocorrem na superfície das partículas. Neste caso, quanto maior a área superficial total, maior a disponibilidade de sítios reativos. Também, é importante em processos como secagem e adsorção, pois afetam a velocidade da transferência de massa e calor, uma vez que são fortemente dependentes da área superficial disponível para o contato com o fluido.

Em operações de filtração e em reações químicas, a área superficial das partículas influencia na porosidade meio poroso formado, como o empacotamento em reatores ou filtros, na distribuição de poros e na capacidade de compactação. A área superficial das partículas, também, pode ser medida experimentalmente por BET (Brunauer-Emmett-Teller) com adsorção de gás, geralmente N_2 .

O cálculo da área superficial traz muitos benefícios em diversos aspectos, pois otimiza as reações químicas e os processos de filtração, com a finalidade de projetos processos mais eficientes; melhora as formulações garantindo um controle melhor das soluções; avalia o desempenho de materiais como catalisadores e pigmentos; e controla a agregação, a viscosidade e a sedimentação de dispersões.

Cálculo da superfície específica das partículas:

O cálculo da área superficial das partículas (\bar{S}), a partir dos dados da análise diferencial, pode ser feito através da Equação 5 (Perry; Green, 2018).

$$\bar{S} = \frac{S}{m} = \frac{\lambda}{\rho_s} \sum_i^n \frac{x_i}{D_i} \quad (\text{Equação 5})$$

Este parâmetro é fundamental em diversos processos, pois fornece uma medida da área total disponível por unidade de massa do material particulado. Quanto maior a superfície específica, maior a velocidade de reações químicas heterogêneas e maior a taxa de adsorção, absorção e troca iônica. Um aumento da superfície específica aumenta a eficiência dos catalisadores, carvões ativados e resinas de troca iônica; melhora a remoção da umidade e aumenta a velocidade de filtração.

Medidas características de material particulado:

Vários tipos de médias podem ser definidos para um dado material constituído de partículas irregulares, como (Perry; Green, 2018; Allen, 1997):

Diâmetro médio aritmético (\bar{D}_q)

O cálculo do diâmetro médio aritmético das partículas, a partir dos dados da análise diferencial, pode ser feito através da Equação 6.

$$\bar{D}_a = \frac{\sum_i^n \frac{x_i}{D_i^2}}{\sum_i^n \frac{x_i}{D_i^3}} \quad (\text{Equação 6})$$

O diâmetro médio aritmético de partículas é uma das maneiras mais simples de se representar o tamanho médio das partículas em uma amostra. É a média dos diâmetros das partículas, sem considerar massa ou volume, apenas o número de partículas em cada faixa. Serve de referência para avaliar dispersão, polidispersão e desvio padrão.

Diâmetro médio superficial (\bar{D}_s)

O cálculo do diâmetro médio superficial das partículas, a partir dos dados da análise diferencial, pode ser feito através da Equação 7.

$$\bar{D}_s = \sqrt{\frac{\sum_i^n \frac{x_i}{D_i}}{\sum_i^n \frac{x_i}{D_i^3}}} \quad (\text{Equação 7})$$

O diâmetro médio superficial das partículas é um parâmetro granulométrico que representa o diâmetro de uma partícula esférica que teria a mesma área superficial média que as partículas reais da amostra. Ele leva em consideração tanto o número de partículas quanto a sua área superficial individual, sendo muito importante em processos em que a área de contato das partículas é relevante, uma vez que esta controla a eficiência do processo, como em adsorção, secagem, extração sólido-líquido e catálise heterogênea.

Diâmetro médio volumétrico (\bar{D}_v)

O cálculo do diâmetro médio volumétrico das partículas, a partir dos dados da análise diferencial, pode ser feito através da Equação 8.

$$\bar{D}_v = \sqrt[3]{\frac{1}{\sum_i^n \frac{x_i}{D_i^3}}} \quad (\text{Equação 8})$$

O diâmetro médio volumétrico das partículas representa o diâmetro de uma partícula esférica que teria o mesmo volume médio que as partículas reais da amostra. Ele é uma das médias mais importantes em análises granulométricas, pois está diretamente relacionado ao volume ou massa das partículas e, por isso, é amplamente usado em operações industriais e de engenharia. Ele está diretamente relacionado ao volume individual de partículas, e é útil para estimar volume total de sólidos e taxas de sedimentação.

Diâmetro médio de Sauter (\bar{D}_s)

O cálculo do diâmetro médio de Sauter, a partir dos dados da análise diferencial, pode ser feito através da Equação 9.

$$\bar{D}_s = \frac{1}{\sum_i^n \frac{x_i}{D_i}} \quad (\text{Equação 9})$$

O diâmetro médio de Sauter, também conhecido como diâmetro médio superfície-volume, é um parâmetro muito importante em análises granulométricas, pois representa o diâmetro de uma partícula esférica que tem o mesmo volume e a mesma área superficial média que as partículas reais.

É especialmente útil, quando há interesse em processos em que tanto o volume quanto a superfície das partículas são importantes, já que ele expressa efetivamente quanto de área superficial está disponível por unidade de volume de partícula. Sendo importante em secagem, adsorção, e reações heterogêneas sólido-fluido.

Média linear dos diâmetros (\bar{D}_a)

O cálculo da média linear dos diâmetros, a partir dos dados da análise diferencial, pode ser feito através da Equação 10.

$$\bar{D}_a = \frac{\sum_i^n x_i \frac{x_i}{D_i}}{\sum_i^n \frac{x_i}{D_i}} \quad (\text{Equação 10})$$

A média linear dos diâmetros é uma forma básica de representar o tamanho médio das partículas, calculada a partir da soma dos diâmetros multiplicados pela fração de partículas, por número ou massa, em cada classe.

Quando não há necessidade de alta precisão, a média linear pode ser usada para estimar a altura de leito fixo; fazer projeções de tempo de residência e comparar o nível de fragmentação num processo de moagem.

2. OBJETIVOS

Muitos processos, como adsorção, filtração e reações químicas, exigem faixas específicas de tamanho de partículas para que possam funcionar corretamente, desta forma os objetivos principais da prática de “Peneiramento” são:

1. Obter frações de materiais com tamanho uniforme, ou seja, separar em faixas de tamanho definidas;

2. Construir as curvas de análise granulométrica de frequência diferencial, análise acumulativa e histograma, para facilitar a análise do perfil de distribuição de tamanhos;
3. Calcular o número de partículas da amostra, assim como os diâmetros médios característicos de materiais heterogêneos.

3. METODOLOGIA

Para o experimento de peneiramento realizado em laboratório, que consiste em passar o material a ser analisado por uma série de peneiras com malhas progressivamente menores, onde cada uma retém uma parte da amostra, deve-se limpar cuidadosamente e pesar cada peneira da série a ser utilizada. Sobre a bandeja inicial, chamada de peneira cega, empilha-se as outras peneiras começando com a de menor abertura da malha. Posteriormente, o conjunto de peneiras, adequadamente empilhadas, devem ser acopladas à mesa agitadora.

Inicia-se o experimento, inserindo a amostra desejada na primeira peneira empilhada, lacra-se com a tampa e prende-se todas elas firmemente ao agitador. Aciona-se o cronômetro e dá-se início a agitação por um determinado intervalo de tempo, de modo a garantir uma separação eficiente em cada faixa granulométrica.

Ao final, retira-se cada peneira e, por balanço de massa, determina-se a massa retida em cada uma delas. Com a massa contida em cada peneira, calcula-se a fração mássica pela Equação 1 e o diâmetro médio das partículas contidas em cada faixa granulométrica pela Equação 2.

Outros parâmetros importantes, dependendo da aplicação desejada, também, podem determinados pela análise granulométrica, como: número de partículas da amostra (Equação 3), diâmetro médio aritmético (Equação 6), diâmetro médio superficial (Equação 7), diâmetro médio volumétrico (Equação 8), diâmetro de Sauter (Equação 9), média linear dos diâmetros (Equação 10).

4. ESTUDO DE CASO

Uma massa de 300 g de material heterogêneo composto de pó da concha de molusco (PCM) foi peneirada com o seguinte conjunto de peneiras da série Tyler: 4 #, 14 #, 24 #, 35 #, 65 # e bandeja cega. Os resultados da análise granulométrica estão apresentados na Tabela 2.

Peneiras Tyler	Diâmetro (mm)	Faixa granulométrica	Massa peneira (g)	Massa peneira com amostra (g)	Massa retida (g)	Diâmetro médio (mm)	Fração retida (%)	FAG (%)	FAF (%)
4	4,699	0+4	394,6	396,0	1,5	4,699	0,49	0,49	99,51
14	1,168	-4+14	379,2	414,8	35,6	2,934	11,85	12,34	87,66
24	0,701	-14+24	370,6	412,0	41,4	0,935	13,79	26,13	73,87
35	0,417	-24+35	363,4	420,6	57,2	0,559	19,06	45,19	54,81
65	0,208	-35+65	358,8	473,6	114,8	0,313	38,27	83,46	16,54
bandeja	0	-65 + bandeja	329,8	379,4	49,6	0,104	16,54	100,00	0,00

Tabela 2. Dados da análise granulométrica por peneiramento.

Dos resultados da Tabela 2, pode-se verificar como as partículas da amostra de PCM estão distribuídas por tamanho, indicando o percentual do material em cada faixa de diâmetro, pela fração retida. No caso, o maior percentual de retenção da amostra foi na faixa granulométrica de -35+65, com 38,3 % de retidos. Os termos fração acumulativa de grossos (FAG) e fração acumulativa de finos (FAF) mostram a distribuição do tamanho de partículas ao longo das peneiras e são usados para construir a curva de distribuição granulométrica acumulada.

Estes resultados são detalhados nos gráficos de distribuição em massa mostrando a análise de frequência (Figura 3), de fração acumulada (Figura 4) e do histograma (Figura 5), confirmando que o material é polidisperso, devido a sua heterogeneidade.

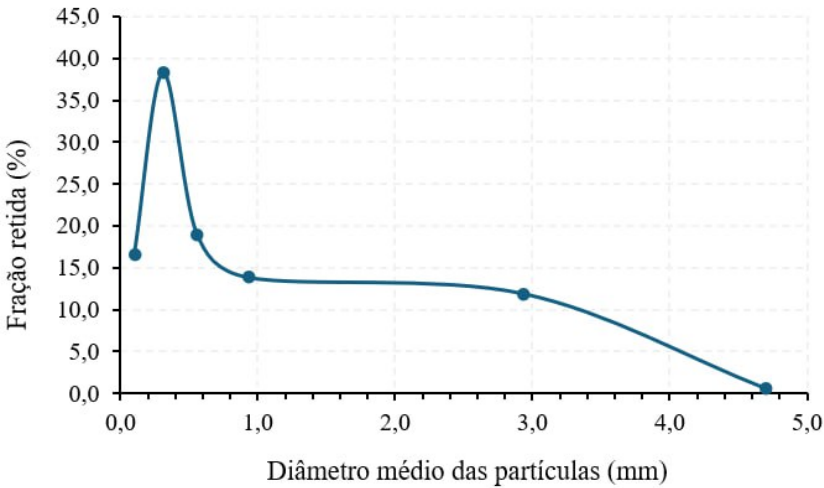


Figura 3. Análise granulométrica diferencial.

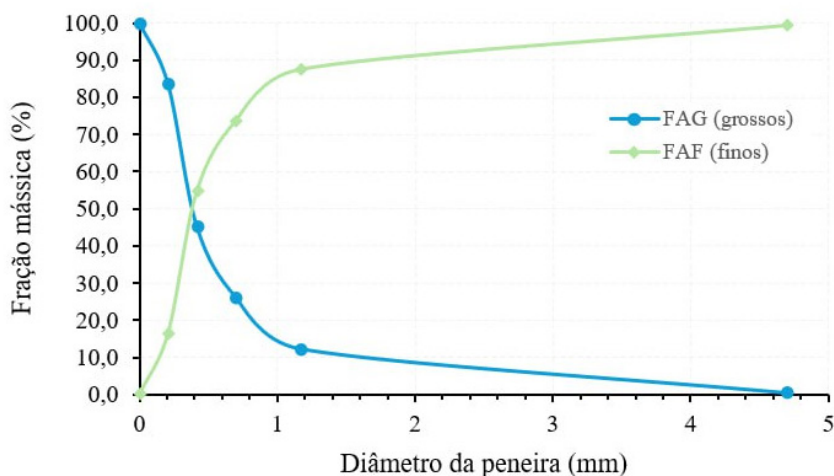


Figura 4. Distribuição granulométrica acumulada.

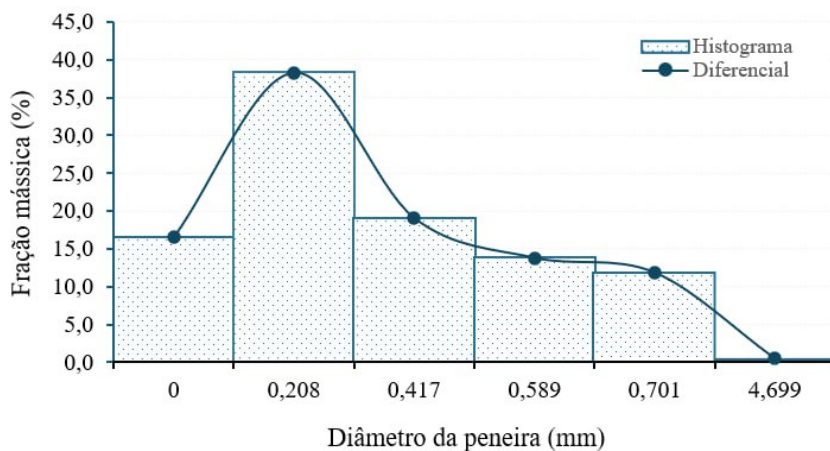


Figura 5. Histograma dos resultados.

Considerando partículas esféricas, com $C = \pi/6$, e a massa específica do PCM igual a $2,8 \text{ g/cm}^3$, foram calculados os principais parâmetros determinados a partir da análise granulométrica do PCM (Tabela 1).

Número de partículas	Diâmetro médio aritmético	Diâmetro Médio superficial	Diâmetro Médio volumétrico	Diâmetro de Sauter	Média linear dos diâmetros
3,29E+07	0,0124 cm	0,0144 cm	0,0184 cm	0,0299 cm	0,0167 cm

Tabela 3. Número de partículas e diâmetros médios da análise granulométrica por peneiramento.

A FAF indica a fração de material que passou pelas peneiras até um determinado tamanho e mostra a porcentagem fina acumulada e serve para identificar os D10, D50 e D90, que correspondem aos tamanhos em que 10 %, 50 % e 90 % das partículas passaram, respectivamente (Figura 6).

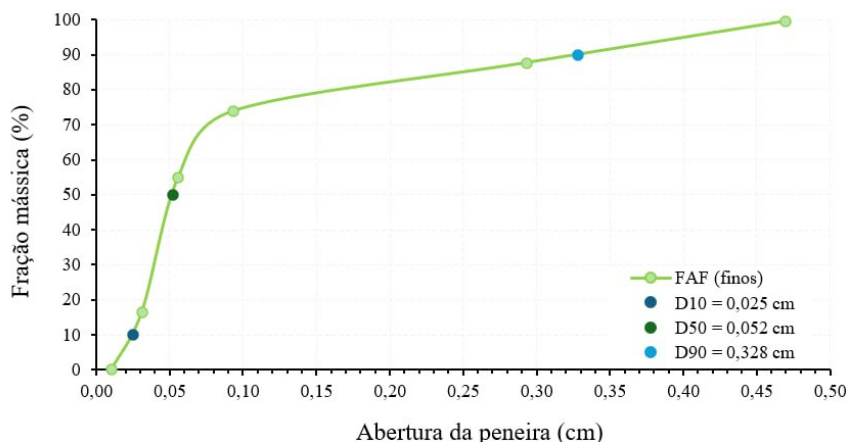


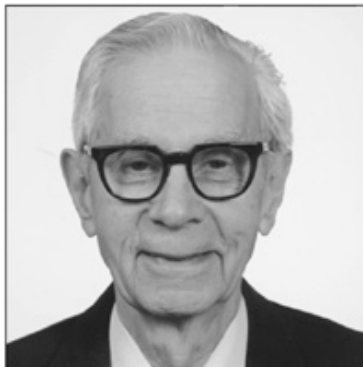
Figura 6. Dados de fração acumulada de finos com D10, D50 e D90.

QUESTIONAMENTOS AOS LEITORES

1. Como a escolha do conjunto de peneiras (tamanho das malhas) afeta os resultados da análise granulométrica?
2. Como a umidade do material pode influenciar o processo de peneiramento?
3. Por que certos cosméticos em pó têm partículas muito finas, e como isso influencia na aplicação da maquiagem? Você acredita que o tamanho das partículas influencia no resultado final do produto?
4. Como a granulometria impacta a eficiência de catalisadores sólidos em reatores químicos? Isso afeta a velocidade de reação em processos químicos industriais?

NOTÁVEIS CIENTISTAS EM OPERAÇÕES UNITÁRIAS

- Christie John Geankoplis (1921 – 2005)



(Geankoplis, 2003)

Christie John Geankoplis foi um engenheiro químico e professor norte-americano amplamente reconhecido por sua contribuição ao ensino e à sistematização das operações unitárias na engenharia química, com ênfase especial nos fenômenos de transporte e operações unitárias. Sua principal obra, o livro *“Transport Processes and Separation Process Principles”*, tornou-se uma das referências mais importantes no ensino da engenharia química, adotado em universidades do mundo inteiro. Geankoplis foi uma figura-chave na formação científica dos engenheiros químicos, oferecendo uma base sólida e acessível para o estudo das operações unitárias, incluindo as operações mecânicas como o peneiramento. Sua obra promoveu uma ponte entre o conhecimento teórico e a prática industrial, permitindo que estudantes e profissionais compreendam, dimensionem e otimizem processos de separação física com base no tamanho de partículas.

REFERÊNCIAS

ALLEN, T. Particle size measurement. 5. ed. Springer, 1997.

GEANKOPLIS, Christie J. Transport Processes and Unit Operations: United States Edition, 3. ed. Prentice Hall, 1993.

MCCABE, Warren L.; SMITH, Julian C.; HARRIOTT, Peter. Unit Operations of Chemical Engineering, 7. ed. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2004.

MUJUMDAR, Arun S. Handbook of industrial drying. 4. ed. CRC Press, 2014.

PERRY, Robert H.; GREEN, Don W. (Ed.). Perry's chemical engineers' handbook. 9. ed. McGraw-Hill, 2018.