

OPERAÇÕES UNITÁRIAS EM SISTEMAS PARTICULADOS E FLUIDOMECÂNICOS

MARCO AURÉLIO CREMASCO

Blucher

Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos

Blucher

Marco Aurélio Cremasco

Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos

Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos

© 2012 Marco Aurélio Cremasco

Editora Edgard Blücher Ltda.

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1.245, 4º andar
04531-012 – São Paulo – SP – Brasil
Tel.: 55 (11) 3078-5366
editora@blucher.com.br
www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed.
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer
meios, sem autorização escrita da Editora.

Todos os direitos reservados pela
Editora Edgard Blücher Ltda.

Ficha Catalográfica

Cremasco, Marco Aurélio
Operações unitárias em sistemas
particulados e fluidomecânicos / Marco Aurélio
Cremasco. -- São Paulo: Blucher, 2012.

Bibliografia
ISBN 978-85-212-0593-7

1. Engenharia química 2. Operações unitárias
3. Sistemas fluidomecânicos 4. Sistemas
particulados I. Título.

11-01735

CDD-660.284292

Índices para catálogo sistemático:

1. Sistemas particulados: Operações unitárias
Engenharia química 660.284292
2. Sistemas fluidomecânicos: Operações
unitárias: Engenharia química 660.284292

Apresentação

A educação é a fonte criadora, transformadora e inovadora que nutre o ser humano. A necessidade da educação deve estar no topo das prioridades de qualquer nação, além de ser a base para a sustentabilidade dos progressos científicos e tecnológicos. O crescimento de uma nação, invariavelmente, está associado aos desenvolvimentos científicos e tecnológicos os quais estão presentes em todas as etapas na obtenção de um produto ou de um processo, desde a sua concepção até o instante em que é posto no mercado.

A tecnologia, por sua vez, não está somente associada a inventos, mas também à contínua transformação, adaptação do já existente, buscando, sobretudo, o melhor, o mais barato, o otimizado e o sustentável. Tendo em vista tal necessidade, uma determinada tecnologia, ainda que com resultados satisfatórios comprovados, pode ser posta em xeque à medida que a curiosidade humana a questiona para aprimorá-la. Para tanto, é essencial o domínio da ciência para a sua aplicação enquanto tecnologia. É nesse contexto que apresentamos o livro *Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos*.

Este livro insere-se no campo de conhecimento das operações unitárias relativas ao fenômeno de transporte de quantidade de movimento e aborda um conjunto dessas operações, que envolvem o transporte de fluido (gás, vapor, líquido; ou a mistura de gases e líquidos e solução entre líquidos distintos), de sólidos, e da mistura sólido e fluido, assim como se refere à interação física presente em contatos fluido–fluido, fluido–sólido, sólido–sólido e sólido–fluido em operações de transporte, mistura, separação de partículas. Dessa maneira, o livro é dividido em duas partes: sistemas fluidomecânicos e sistemas particulados.

Sistemas fluidomecânicos são, usualmente, definidos como um conjunto formado por máquinas e/ou dispositivos cuja função é adicionar ou extrair energia para (ou de) um fluido de trabalho. São apresentadas, neste livro, noções sobre as operações unitárias em sistemas fluidomecânicos presentes na movimentação (transporte, agitação etc.) de fluidos ou mistura sólido–fluido por meio de máquinas de fluidos tais como bombas, compressores e sopradores. Tais sistemas são

abordados a partir do segundo capítulo, em que há uma revisão básica de mecânica de fluidos, seguindo-se os capítulos relativos a bombas e compressores, até o quinto capítulo, no qual se apresenta a operação de agitação de líquidos. Inclui-se a agitação como um dispositivo fluidomecânico, na medida em que, para um sistema agitado, adiciona-se energia com o objetivo de promover mistura.

Já nos sistemas particulados existe a preocupação relativa ao entendimento fenomenológico da interação sólido–fluido e sólido–sólido, envolvendo ou não o efeito de dispositivos fluidomecânicos. Os sistemas particulados estão, portanto, presentes na caracterização de particulados, na dinâmica da partícula isolada, na fluidodinâmica da mistura fluido–partícula, assim como na separação de particulados, no escoamento de fluidos através de leitos fixos e móveis de partículas; fluidização, transporte pneumático e hidráulico de sólidos, sedimentação e filtração.

As operações unitárias referentes aos sistemas particulados são apresentadas do Capítulo 6 ao 14, sendo que no sexto capítulo introduz-se a caracterização de partículas, tais como porosidade, diâmetro, esfericidade e distribuição granulométrica. No Capítulo 7 expõe-se a fluidodinâmica de uma partícula isolada, na qual se apresentam conceitos sobre velocidade terminal, coeficientes de arraste e força resistiva. No Capítulo 8 são apresentadas técnicas de separação de particulados tendo como fundamento a trajetória da partícula. Tais técnicas são baseadas na ação gravitacional, como é o caso de elutriação e câmara de poeira, e na ação centrífuga, em que se aborda a separação mecânica utilizando-se equipamentos ciclônicos (ciclones e hidrociclones). Estuda-se, no Capítulo 9, a fluidodinâmica de sistemas particulados a partir da definição de concentração de partículas, bem como da apresentação da teoria das misturas da mecânica do contínuo, visando à obtenção das equações da continuidade e do movimento para as fases fluida e particulada em uma dada mistura. São tais equações que possibilitarão a introdução da fluidodinâmica afeita às operações unitárias que seguirão nos capítulos subsequentes, como o Capítulo 10, no qual se trata do escoamento de fluidos em leitos fixos e colunas recheadas; no Capítulo 11, em que a fluidização, homogênea e heterogênea, é estudada, incluindo o contato em leito de jorro; no Capítulo 12, em que se apresenta o transporte de sólidos por arraste de fluidos, ou seja, os transportes pneumático e hidráulico. Os dois últimos capítulos referem-se ao escoamento de sólidos em meios deformáveis relativos à sedimentação e à filtração.

A proposta deste livro é a de apresentar, de forma simultânea, a formulação básica dos fenômenos que aparecem nas operações unitárias relativas ao transporte de quantidade de movimento, como também a sua imediata aplicação tecnológica. São fornecidos, ao longo dos capítulos, exemplos resolvidos para que o leitor (em particular o estudante) possa complementar o seu estudo. Apresenta-se, também, no final do livro, um conjunto de exercícios com os respectivos resultados.

Tendo em vista o formato apresentado neste livro, esta obra cobre boa parte da ementa normalmente proposta para a disciplina Operações unitárias I (ou à semelhança) a qual envolve o manuseio de particulados (sem transformação química e sem os efeitos de fenômenos de transferência de calor e de massa e daqueles processos que exigem o conhecimento de termodinâmica). A obra, portanto,

pode ser utilizada em cursos de graduação e de pós-graduação, sendo neste, em especial, em tópicos relativos a sistemas particulados. Por via de consequência, este livro pode ser utilizado como material de apoio na formação de profissionais, assim como pelos já profissionais de engenharia química, de alimentos, mecânica, agrícola, de alimentos, de produção, mecânica, química tecnológica, entre outras profissões.

Marco Aurélio Cremasco

Para
Solange Bonilha Ribeiro Cremasco,
minha esposa

Conteúdo

1	INTRODUÇÃO ÀS OPERAÇÕES UNITÁRIAS.	19
1.1	Introdução	19
1.2	Processo	21
1.3	Operações unitárias	21
1.4	Sistemas fluidomecânicos e particulados	24
1.5	Bibliografia consultada.	27
2	PRINCÍPIOS DE SISTEMAS FLUIDOMECÂNICOS.	29
2.1	Introdução	29
2.2	Fluidos e classificação reológica	29
2.3	Dinâmica do escoamento de fluidos..	31
2.3.1	Equação da continuidade para um fluido homogêneo. ...	31
2.3.2	Equação do movimento para um fluido homogêneo.	32
2.4	Equação simplificada para a energia mecânica	34
2.5	Atrito mecânico e perda de carga..	36
2.6	Perdas de energia ou de carga em acidentes	43
2.6.1	Coefficiente de perda de carga localizada	44
2.6.2	Método do comprimento equivalente	45
2.7	Bibliografia consultada.	49
2.8	Nomenclatura	51

3	BOMBAS	53
3.1	Introdução	53
3.2	Classificação de bombas	54
3.2.1	Bombas dinâmicas ou turbobombas	54
3.2.2	Bombas de descolamento positivo	56
3.3	Condições de utilização de bombas	58
3.4	Altura de projeto	59
3.5	Potência e rendimentos de bombas	62
3.6	Altura de sucção disponível ou saldo positivo de carga de sucção (NPSH)	63
3.7	Curva característica de bombas	68
3.8	Acoplamento de bombas a sistemas em série e em paralelo	70
3.8.1	Sistema em série	70
3.8.2	Sistema em paralelo	71
3.9	Bibliografia consultada	72
3.10	Nomenclatura	73
4	COMPRESSORES E SOPRADORES	75
4.1	Introdução	75
4.2	Classificação de compressores	76
4.3	Faixas operacionais de compressores	79
4.4	Trabalho de compressão	79
4.4.1	Compressor de único estágio	79
4.4.2	Compressor de múltiplos estágios	82
4.5	Curva característica de sopradores	83
4.6	Lei dos sopradores	87
4.6.1	Primeira lei dos sopradores	88
4.6.2	Segunda lei dos sopradores	89
4.6.3	Terceira lei dos sopradores	91
4.7	Bibliografia consultada	94
4.8	Nomenclatura	94

5	AGITAÇÃO E MISTURA	97
5.1	Introdução	97
5.2	Características de um tanque agitado	97
5.3	Padrões de fluxo	99
5.4	Tipos de impelidores	101
5.5	Potência de agitação	104
5.6	Níveis de agitação	109
5.7	Fatores de correção no projeto de sistemas de agitação	111
5.8	Ampliação de escala	117
5.8.1	Semelhança geométrica	118
5.8.2	Semelhança fluidodinâmica	118
5.8.3	Manutenção do nível de agitação	119
5.9	Bibliografia consultada	124
5.10	Nomenclatura	124
6	CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS	127
6.1	Introdução	127
6.2	Características físicas de uma partícula isolada	127
6.2.1	Porosidade da partícula	129
6.2.2	Massa específica da partícula	131
6.2.3	Área específica superficial	133
6.2.4	Morfologia das partículas	134
6.3	Tamanho de partículas	141
6.3.1	Peneiramento	142
6.3.2	Difração de luz	144
6.3.3	Análise de imagens	144
6.4	Análise granulométrica	145
6.5	Diâmetro médio de partícula	148
6.6	Modelos para a distribuição granulométrica	151
6.7	Bibliografia consultada	154
6.8	Nomenclatura	157

7	FLUIDODINÂMICA DE UMA PARTÍCULA ISOLADA	159
7.1	Introdução	159
7.2	Dinâmica de um ponto material..	159
7.3	Velocidade terminal	165
7.3.1	Efeito da presença de contornos rígidos na velocidade terminal.	168
7.3.2	Efeito da concentração de sólidos na velocidade terminal	170
7.4	Força resistiva	171
7.5	Comprimento da região de aceleração	173
7.6	Bibliografia consultada.	178
7.7	Nomenclatura	179
8	SEPARAÇÃO DE PARTICULADOS POR AÇÃO GRAVITACIONAL E CENTRÍFUGA.	181
8.1	Introdução	181
8.2	A trajetória da partícula	181
8.3	Separação de partículas sujeitas ao campo gravitacional	182
8.3.1	Elutriação.	184
8.3.2	Câmara de poeira.	185
8.4	Separação de partículas sujeitas ao campo centrífugo	189
8.4.1	Centrifugação e especificação de centrífugas..	190
8.5	Separadores centrífugos: ciclones e hidrociclones	193
8.5.1	Características geométricas e fluidodinâmicas em ciclones e hidrociclones	193
8.5.2	Separação de particulados em ciclones e hidrociclones ..	196
8.5.3	Eficiência individual de coleta no campo centrífugo	199
8.5.4	Queda de pressão em equipamentos ciclônicos	200
8.5.5	Sistemas em série e em paralelo de equipamentos ciclônicos	203
8.6	Bibliografia consultada..	210
8.7	Nomenclatura	211

9	FLUIDODINÂMICA EM SISTEMAS PARTICULADOS E GRANULARES	215
9.1	Introdução	215
9.2	Definições para concentração	216
9.3	Teoria das misturas da mecânica do contínuo.	218
9.3.1	Equações da continuidade para as fases fluida e particulada	218
9.3.2	Equações do movimento para as fases presentes na mistura	219
9.4	Equações constitutivas.	222
9.4.1	A força resistiva	222
9.4.2	O tensor tensão.	223
9.5	Condições de fronteira.	226
9.5.1	Condição inicial	227
9.5.2	Condições de contorno.	227
9.6	Bibliografia consultada.	232
9.7	Nomenclatura	234
10	ESCOAMENTO DE FLUIDOS EM LEITOS FIXOS E COLUNAS RECHADAS	237
10.1	Introdução	237
10.2	A fração de vazios (ou porosidade do leito).	238
10.3	Fluidodinâmica em leitos fixos.	245
10.4	Permeabilidade.	247
10.5	O modelo capilar.	248
10.6	Colunas recheadas.	252
10.6.1	Balanco macroscópico de matéria em uma coluna recheada	254
10.6.2	Queda de pressão e ponto de inundação em uma coluna recheada	256
10.7	Bibliografia consultada.	262
10.8	Nomenclatura	263

11	FLUIDIZAÇÃO	265
11.1	Introdução	265
11.2	Regimes fluidodinâmicos na fluidização	265
11.3	Fluidodinâmica da fluidização	267
11.3.1	Fluidização homogênea	268
11.3.2	Fluidização heterogênea	277
11.4	Elutriação (arraste de partículas)	281
11.5	Leito de jorro	283
11.5.1	Curva característica do leito de jorro	284
11.5.2	Fluidodinâmica do leito de jorro em colunas cilíndricas ..	286
11.6	Bibliografia consultada	291
11.7	Nomenclatura	293
12	TRANSPORTE DE SÓLIDOS POR ARRASTE EM FLUIDOS	295
12.1	Introdução	295
12.2	Descrição do transporte vertical	298
12.2.1	Regime diluído	300
12.2.2	Regime denso	300
12.2.3	<i>Choking</i>	301
12.3	Fluidodinâmica do transporte vertical	302
12.3.1	Queda de pressão no transporte vertical em regime estabelecido	306
12.3.2	Comprimento da região de aceleração no transporte vertical	308
12.4	Descrição do transporte horizontal	314
12.5	Fluidodinâmica do transporte horizontal	316
12.5.1	Queda de pressão no transporte hidráulico de suspensões homogêneas	317
12.6	Bibliografia consultada	320
12.7	Nomenclatura	322

13	SEDIMENTAÇÃO	325
13.1	Introdução	325
13.2	Fatores que afetam a sedimentação	327
13.3	Tipos de sedimentadores	328
13.4	Fluidodinâmica da sedimentação	330
13.5	Projeto de um sedimentador convencional contínuo	333
13.5.1	Cálculo da área do sedimentador	333
13.5.2	Cálculo da altura do sedimentador	345
13.6	Bibliografia consultada	350
13.7	Nomenclatura	352
14	FILTRAÇÃO	355
14.1	Introdução	355
14.2	Tipos de filtros	356
14.2.1	Filtros de pressão ou simples	356
14.2.2	Filtros a vácuo	358
14.3	Meios filtrantes	360
14.4	Fluidodinâmica da filtração	361
14.5	Filtração com formação de torta: teoria simplificada da filtração	367
14.6	Filtração com tortas compressíveis	372
14.7	Filtração com tortas incompressíveis	374
14.7.1	Filtro prensa	376
14.7.2	Filtro a vácuo de tambor rotativo	381
14.8	Bibliografia consultada	386
14.9	Nomenclatura	387
	EXERCÍCIOS PROPOSTOS	389
	ÍNDICE REMISSIVO	417

Capítulo

1

Introdução às operações unitárias

1.1 Introdução

É fundamental para o(a) profissional de engenharia e de tecnologia compreender a natureza de um processo produtivo, desde aspectos microscópicos (propriedades físico-químicas da matéria envolvida em etapas de produção; grandezas termodinâmicas e fenomenológicas etc.), até aspectos macroscópicos (balanço de matéria e de energia, detalhamento de equipamentos e acessórios, instrumentação etc.). Assim, um dos elementos-chave na formação e na atuação desse(a) profissional é a compreensão do processamento de uma determinada matéria-prima para obter certo produto, conforme esquematizado na Figura 1.1.

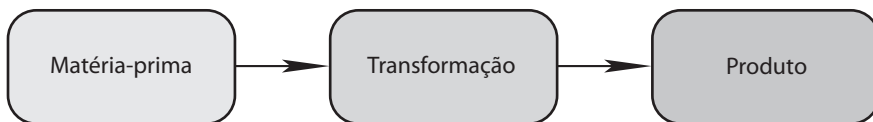


Figura 1.1 Processo básico de transformação.

Ao se pensar em um produto, pode-se vislumbrá-lo tanto no resultado de alta tecnologia quanto no oriundo de processos artesanais ou mesmo em algo que todos utilizam (ou ao qual deveriam ter acesso) diariamente como é o caso da água tratada, na qual a matéria-prima corresponde à água bruta, coletada em um manancial, e o produto, a água de abastecimento às residências. Entre a água bruta e a água tratada existe um processo (Figura 1.2). De maneira bastante simplificada, pode-se descrever o tratamento de água por meio das seguintes etapas:

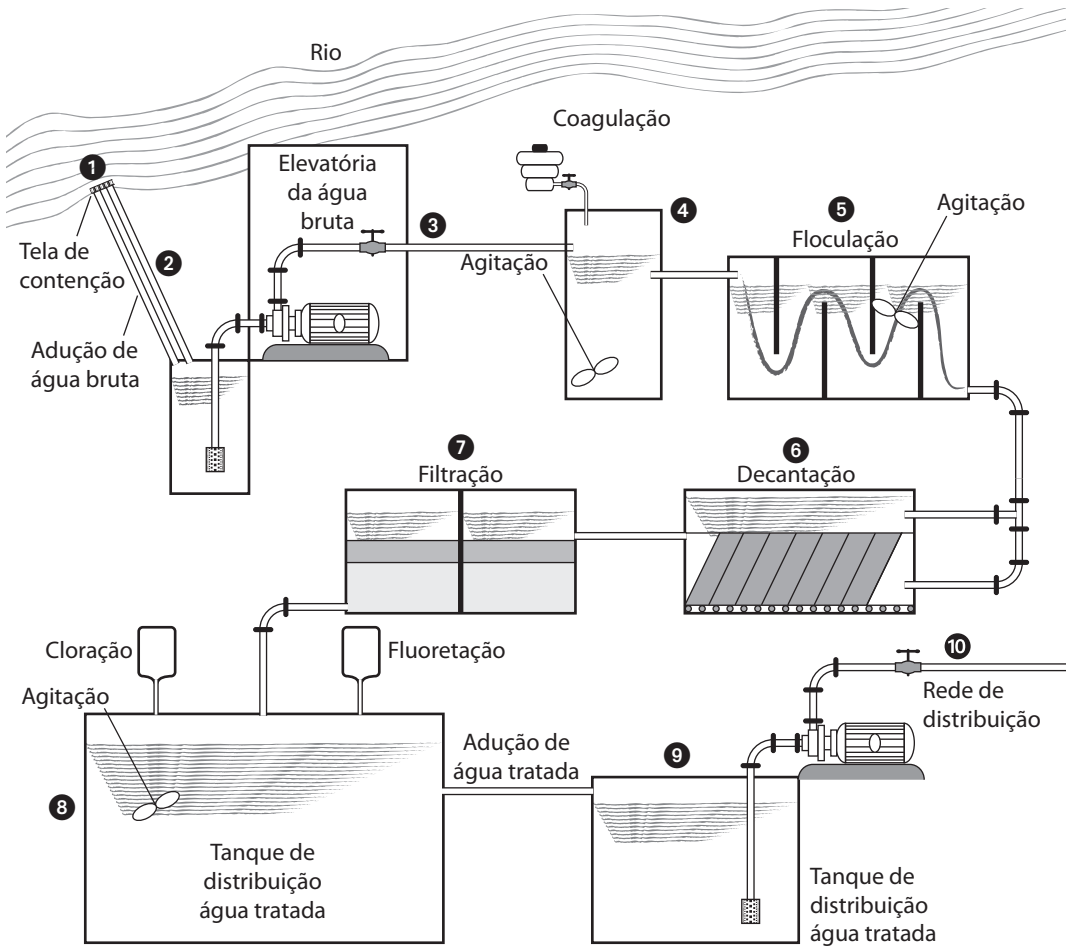


Figura 1.2 Processo simplificado de tratamento de água (baseada em O₂ Engenharia e Saneamento Ambiental, 2011).

1. retenção macroscópica de sólidos utilizando-se dispositivos de contenção;
2. sucção (adução) da água bruta ao reservatório de água bruta;
3. bombeamento da água bruta a um reservatório de coagulação, com agitação intensa, no qual adicionam-se agentes flocculantes como o sulfato de alumínio, $Al_2(SO_4)_3$;
4. transporte da água bruta a um flocculador;
5. flocculadores, que são tanques com agitação suave, nos quais existe a aglutinação das partículas para facilitar a posterior decantação;
6. transporte da água flocculada a um decantador (clarificador, no caso) para promover a separação de aglomerados de partículas;
7. transporte da água clarificada a um filtro para reter partículas de menores diâmetros;
8. transporte de água filtrada a um tanque agitado no qual existe adição de agentes antipatogênicos, como a cloração e a fluoretação;
9. adução de água tratada a um tanque de distribuição;
10. bombeamento de água tratada à rede de distribuição.

1.2 Processo

Ao se observar as Figuras 1.1 e 1.2, constata-se que existe um *processo*, ou seja, uma atividade (Figura 1.1) ou um conjunto de atividades (Figura 1.2) em que houve um *input* (matéria-prima) para o qual foi agregado determinado valor (materiais e equipamentos utilizados no tratamento de água), de modo a gerar um *output* (produto) a um cliente (consumidor). De modo mais formal, define-se *processo* como um conjunto de atividades realizadas em sequência lógica com o objetivo de produzir um bem de consumo (ou de serviço) para atender as necessidades dos *stakeholders*, os quais são os vários públicos associados aos processo produtivo e de consumo. Processo é um conceito fundamental no projeto dos meios de uma empresa que pretende produzir e entregar seus produtos e/ou serviços aos *stakeholders*. A análise dos processos no *locus* de produção (indústria, universidade, laboratório etc.) implica identificar as diversas dimensões envolvidas em tal produção: fluxo (volume por unidade de tempo), sequência de atividades, esperas e duração do ciclo, dados e informações, pessoas envolvidas, relações e dependências entre as partes comprometidas no funcionamento do processo.

Shereve e Brink (1977) mencionam que, dentro da indústria química, o processamento tem por base a conversão química (ou reação), como na manufatura do ácido sulfúrico a partir do enxofre, bem como o processamento baseado tão somente na *modificação física*, como é o caso da destilação para separar e purificar frações de petróleo. Seja qual for a natureza da transformação (química e/ou física) da matéria-prima, pode-se entender o processamento químico segundo elementos industriais a ele relacionados. Torna-se, desta feita, fundamental o conhecimento e beneficiamento (físico e/ou químico) da matéria-prima bruta, para caracterizá-la com o objetivo de determinar propriedades físicas e/ou químicas utilizando-se ensaios de desempenho. É importante conhecer o estado físico das matérias-primas brutas e beneficiadas para verificar a necessidade de embalagem e mesmo de estocagem desse material. Depois de se processarem as matérias-primas por meio de equipamentos adequados de operação unitária e/ou reatores químicos, obtêm-se os produtos desejáveis ao mercado e aqueles que podem retornar ao processo. Tal descrição está ilustrada no *fluxograma* presente na Figura 1.3. Aqui, pode-se retomar a obra de Shereve e Brink (1977), na qual se encontra a definição de *fluxograma* como: uma sequência coordenada de conversões químicas e de operações unitárias, expondo, assim, aspectos básicos do processo químico. Indica os pontos de entrada das matérias-primas e de energia necessárias às etapas de transformação e também os pontos de remoção do produto e dos subprodutos.

1.3 Operações unitárias

Ao se observar a Figura 1.1 nota-se uma etapa intermediária entre a matéria-prima (água bruta) e o produto (água tratada). Essa etapa, por sua vez, é caracterizada por diversas atividades ou etapas de tratamento, como pode ser notado por inspeção da Figura 1.2. Tais etapas de tratamento, em acordo com o fluxograma

apresentado na Figura 1.3, são de naturezas física e/ou química. Ao identificar-se determinado tratamento ou etapa de processo como sendo de *natureza física*, tem-se uma *operação unitária*.

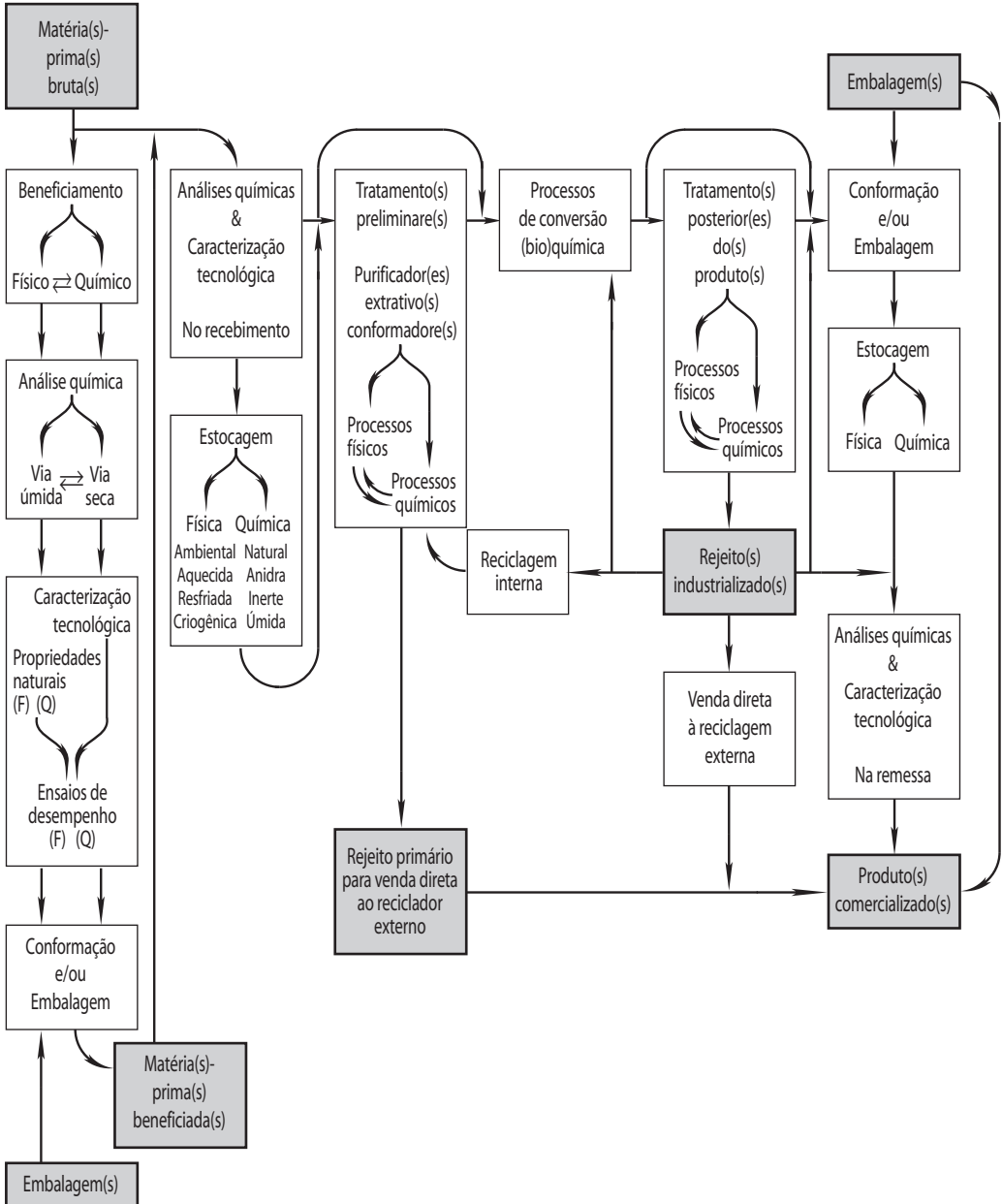


Figura 1.3 Fluxograma de um processo genérico (CREMASCO, 2010).

Dessa maneira, propõe-se a seguinte definição para operações unitárias:

Operações unitárias constituem-se de etapas individuais, visando ao tratamento e/ou separação e/ou transporte físico de matéria e/ou energia, presentes em um processo (bio)químico. Este, por sua vez, diz respeito à transformação (bio)química e/ou física, qualquer que seja a escala, de uma determinada matéria-prima em um produto de valor agregado. Classificadas como conhecimentos tecnológicos, as técnicas das operações unitárias são baseadas nas ciências da engenharia, principalmente em fenômenos de transporte, o que permite que uma determinada operação unitária, ainda que presente em distintos processos (bio)químicos, mantenha sua unicidade e características, independentemente da natureza (bio)química dos componentes envolvidos e do processo (bio)químico em si.

Qualquer que seja o processo, este é constituído por passos, beneficiamento físico ou etapas que são iguais em outros tipos de processos de transformação, podendo ser analisados independentemente dos processos particulares em que estejam inseridos, conforme ilustra o Quadro 1.1. Por exemplo, etapas ou operações de evaporação, filtração, moagem e secagem poderiam ser estudadas independentemente do processo a que pertencem ou dos materiais a serem processados.

Quadro 1.1 Operações unitárias presentes em alguns processos de produção (CREMASCO, 2010)

Operações unitárias	Processos que envolvem a produção de:
Evaporação	Adesivos e selantes; Antibióticos; Fertilizantes; Fibras artificiais; Verniz.
Filtração	Adesivos e selantes; Ácido sulfúrico; Antibióticos; Cerveja; Fibras artificiais; Resinas; Sabão; Tinta.
Moagem	Adesivos e selantes; Adubos; Fertilizantes; Fibras artificiais; Inseticidas; Perfumes; Resinas; Verniz.
Secagem	Adesivos e selantes; Adubos; Ácido sulfúrico; Antibióticos; Cerveja; Fármacos; Fertilizantes; Inseticidas; Papel; Resinas; Sabão; Tinta.

As operações unitárias, geralmente, são vistas como aplicações tecnológicas das ciências básicas (matemática, física, química e biologia) e ciências de engenharia. No caso da engenharia química, por exemplo, as ciências que fundamentam as operações unitárias são a termodinâmica e os fenômenos de transporte. As ciências da engenharia química fornecem os suportes conceituais à aplicação técnica das operações unitárias, caracterizando-as como tecnologias da engenharia química. A partir dessa relação entre ciência e tecnologia, é possível classificar as operações unitárias, tendo como base os principais fenômenos de transporte que as fundamentam, conforme ilustra a Figura 1.4.

No Quadro 1.2 encontram-se as relações entre ciência e tecnologia, exemplificadas por meio da vinculação entre algumas operações unitárias e os seus respectivos fenômenos de transporte, assim como os produtos característicos da indústria química e correlatas nos quais estão presentes.

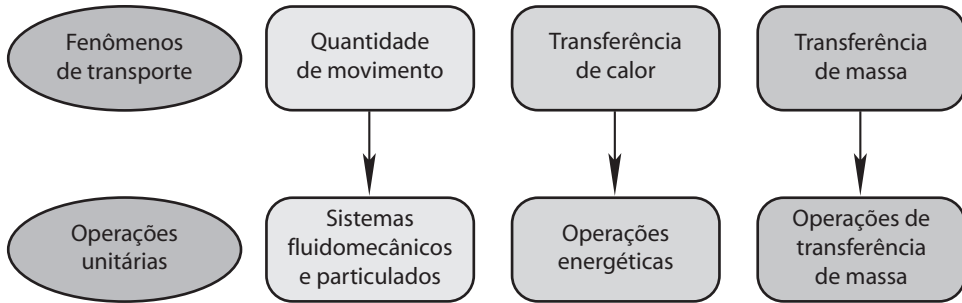


Figura 1.4 Relação entre fenômenos de transporte e operações unitárias.

1.4 Sistemas fluidomecânicos e particulados

Apesar da classificação pretendida na Figura 1.4, é importante ressaltar que as *operações unitárias de sistemas fluidomecânicos e particulados* poderiam ser classificadas como operações unitárias de quantidade de movimento, assim como outras denominações, desde que o conjunto dessas operações unitárias envolva o transporte de fluido (gás, vapor, líquido; ou a mistura de gases e líquidos e solução entre líquidos distintos), de sólidos, e da mistura sólido e fluido, assim como envolva a interação física presente em contatos fluido–fluido, fluido–sólido e sólido–sólido em operações de transporte, mistura, separação e modificação de tamanho de partículas.

Os sistemas *fluidomecânicos* são, usualmente, definidos como um conjunto formado por máquinas e/ou dispositivos cuja função está em adicionar ou extrair energia para (ou de) um fluido de trabalho. Esse fluido pode estar confinado entre as fronteiras do sistema formado pelo conjunto de máquinas e/ou dispositivos ou escoar através dessas fronteiras. Entende-se, portanto, como operações unitárias de *sistemas fluidomecânicos* as etapas de um processo em que está presente a movimentação (transporte, agitação etc.) de fluidos ou mistura sólido–fluido por meio de *máquinas de fluidos*. Tais máquinas são dispositivos que promovem a troca de energia entre um sistema mecânico e um fluido, transformando energia mecânica em energia de fluido ou energia de fluido em energia mecânica. São exemplos clássicos de máquinas de fluido: bombas, compressores e sopradores. Por outro lado, na medida que em um sistema agitado adiciona energia a uma suspensão líquido–sólido, por exemplo, para que promova a sua mistura, o equipamento (o conjunto motor e impelidor) utilizado na operação de agitação também pode ser considerado como uma máquina de fluido e, portanto, um sistema fluidomecânico. No tratamento de água ilustrado na Figura 1.2 e considerando que a água tratada e que abandona o filtro é isenta de particulados, identificam-se, como *apenas* sistemas fluidomecânicos, por exemplo, as etapas 8 (agitação) e 10 (bombeamento).

Quadro 1.2 Fenômenos de transporte e Operações unitárias (CREMASCO, 2010)

Ciência	Tecnologia	Tipo	Descrição	Encontrado na fabricação de:
Mecânica dos fluidos	Sistemas fluidodinâmicos e particulados	Centrifugação	Separação de líquidos utilizando-se a força centrífuga, com a qual a fase mais pesada deste líquido segue para a periferia do compartimento, enquanto a fase mais leve é concentrada no meio do compartimento da centrífuga.	Fármacos. Resinas.
Mecânica dos fluidos	Sistemas fluidodinâmicos e particulados	Ciclones	Separação de sólidos de tamanhos distintos por meio da ação centrífuga.	Fertilizantes. Sabão.
Mecânica dos fluidos	Sistemas fluidodinâmicos e particulados	Elutriação	Separação de partículas sólidas, tendo como base a diferença de diâmetro e de densidade.	Fertilizantes. Extração de diamante.
Mecânica dos fluidos	Sistemas fluidodinâmicos e particulados	Filtração	Separação de particulados por diferença no tamanho entre as partículas e os poros ou interstícios do meio filtrante.	Adesivos. Fibras artificiais.
Mecânica dos fluidos	Sistemas fluidodinâmicos e particulados	Flotação	Separação de sólidos por meio da suspensão de matéria para a superfície de um líquido na forma de espuma e subsequente remoção.	Resinas. Tratamento de água.
Mecânica dos fluidos	Sistemas fluidodinâmicos e particulados	Sedimentação	Processo de separação de particulados por meio da deposição de material.	Papel. Tinta.
Transferência de calor	Operações energéticas	Aquecimento	Inserção de energia a um fluido ou sólido.	Adesivos. Fertilizantes.
Transferência de calor	Operações energéticas	Condensação	Mudança da fase vapor de um fluido para a de líquido.	Inseticidas. Derivados de petróleo.
Transferência de calor	Operações energéticas	Produção de vapor (Caldeiras)	Retirada de energia de um fluido ou sólido.	Açúcar. Adbuos.
Transferência de calor	Operações energéticas	Refrigeração	Retirada de energia de um fluido ou sólido.	Alimentos. Bebidas.
Transferência de calor	Operações energéticas	Resfriamento	Retirada de energia de um fluido ou sólido.	Fertilizantes. Resinas.
Transferência de calor	Operações energéticas	Vaporização	Mudança da fase líquida de um fluido para a de vapor.	Antibiótico. Fibras artificiais.

(continua)

Quadro 1.2 Fenômenos de... (*continuação*)

Ciência	Tecnologia	Tipo	Descrição	Encontrado na fabricação de:
Transferência de massa	Operação de transferência de massa	Absorção	Separação preferencial de molécula(s) presente(s) em uma mistura gasosa, por meio da sua retenção em um líquido.	Ácido sulfúrico. Fertilizantes.
Transferência de massa	Operação de transferência de massa	Adsorção	Separação preferencial de molécula(s) presente(s) em um fluido (gás ou líquido), por meio da sua fixação em sólido adsorvente.	Fármacos. Resinas.
Transferência de massa	Operação de transferência de massa	Cristalização	Separação de um componente presente em uma solução, por meio da sua dissolução em um solvente.	Açúcar. Fármacos.
Transferência de massa	Operação de transferência de massa	Destilação	Separação de líquidos por aquecimento, baseada na diferença de seus pontos de ebulição (ou de pressão de vapor).	Derivados de petróleo. Tinta.
Transferência de massa	Operação de transferência de massa	Extração líquido-líquido	Separação preferencial de um líquido em mistura com outro(s) por ação de um terceiro líquido.	Fármacos. Derivados de Petróleo.
Transferência de massa	Operação de transferência de massa	Separação por membranas	Separação de moléculas de diferentes tamanhos utilizando-se uma barreira seletiva, capaz de permitir a passagem de determinados compostos, retendo as demais substâncias.	Aromas naturais. Bebidas.

Já nos *sistemas particulados* existe, necessariamente, a preocupação relativa ao entendimento fenomenológico da interação sólido-fluido e sólido-sólido envolvendo ou não o efeito de dispositivos fluidomecânicos. Os sistemas particulados estão, portanto, associados às operações de transporte, mistura, separação e modificação de tamanho de sólidos; escoamento de fluidos através de leitos fixos e móveis de partículas; centrifugação sólido-líquido; agitação de mistura sólido-líquido; separação de partículas por ciclones, hidrociclones, sedimentação, filtração; transporte pneumático e hidráulico de sólidos. No tratamento de água ilustrado na Figura 1.2, identificam-se, por exemplo, como *apenas* sistemas particulados as etapas 6 (sedimentação) e 7 (filtração).

Ressalte-se que os sistemas fluidomecânicos e particulados, usualmente, coexistem. Um exemplo característico é a etapa 5 (floculação) presente na Figura 1.2 em que há, concomitantemente, a adição de energia no sistema para haver a sua movimentação (agitação), assim como a formação de aglomerados de partículas (interação sólido-sólido e sólido-líquido, característica básica de sistemas particulados).

1.5 Bibliografia consultada

CREMASCO, M. A. *Vale a pena estudar engenharia química*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

O₂ ENGENHARIA E SANEAMENTO AMBIENTAL. Disponível em: <www.o2engenharia.com.br>. Acesso em: 03 mar. 2011.

SHEREVE, R. N.; BRINK, J. A. *Indústria de processos químicos*. 4. ed. Trad. MACEDO, H. Rio de Janeiro: Guanabara, 1977.