

# Sumário

---

## Capítulo 1

<b>PRINCÍPIOS DO TRANSPORTE DE MASSA</b> .....	<b>1</b>
1.1 Mecanismo do Transporte de Massa .....	1
1.1.1 Velocidade de Difusão .....	1
1.1.2 Difusão Molecular .....	3
1.1.2.1 Difusividade .....	3
1.1.3 Difusão em Sistemas Multicomponentes .....	11
1.1.4 Modelo Aproximado para Transferência de Massa Multicomponente .....	12
1.2 Fluxo por Difusão Molecular .....	15
1.2.1 Difusão Unimolecular .....	16
1.2.2 Difusão Equimolecular Contracorrente .....	17
1.3 Coeficientes de Transferência de Massa .....	18
1.4 Transferência de Massa entre Fases .....	20
1.4.1 Equilíbrio Físico .....	20
1.4.2 Difusão entre Duas Fases .....	22
1.4.2.1 Coeficientes Globais de Transferência de Massa .....	23
1.4.2.2 Coeficientes Locais .....	25

## Capítulo 2

<b>INTERNOS DE TORRES</b> .....	<b>29</b>
2.1 Introdução aos Sistemas de Contato Gás-Líquido .....	30
2.2 Torres de Pratos .....	32
2.1.1 Pratos sem downcomer .....	32
2.2.2 Pratos com downcomer .....	35
2.2.2.1 Pratos com Borbulhadores .....	35
2.2.2.2 Pratos Perfurados .....	36
2.2.2.3 Pratos Valvulados .....	37
2.2.2.4 Pratos de Alta Capacidade .....	38
2.3 Torres Recheadas .....	42
2.3.1 Recheios randômicos .....	42

2.3.2 Recheios estruturados .....	47
2.3.2.1 Recheios estruturados tradicionais .....	47
2.3.2.2 Recheios estruturados de alta eficiência.....	48
2.4 Internos Associados aos Pratos e Recheios .....	56
2.4.1 Seção de Topo .....	56
2.4.2 Seção Intermediária .....	62
2.4.3 Seção de Fundo .....	66
2.4.4 Tópicos Especiais .....	70

### Capítulo 3

<b>TORRES DE PRATOS .....</b>	<b>73</b>
Definição da Configuração dos Pratos.....	73
Considerações Básicas sobre Hidráulica .....	74
Eficiência do Prato.....	77
3.1 Projeto Preliminar.....	78
Procedimento Geral de Projeto .....	78
3.1.1 Cálculo Preliminar do Diâmetro, Segundo Correlação do Tipo de Souders e Brown .....	79
3.1.2 Projeto Preliminar do Diâmetro, Segundo o Manual da Koch-Glitsch (Glitsch 1974) .....	82
3.1.3 Características Gerais do Prato.....	86
3.1.3.1 Arranjo Geral do Prato .....	86
3.1.3.2 Downcomers .....	89
3.1.3.3 Vertedores, Chicanas e Folgas .....	98
3.1.3.4 Espaçamento entre Pratos .....	100
3.1.3.5 Travessões Principais .....	101
3.1.3.6 Nivelamento dos Pratos .....	101
3.1.3.7 Furos de Drenagem e Vazamento entre Pratos.....	102
3.1.3.8 Alçapões .....	102
3.2 Considerações Gerais em Hidráulica do Prato .....	103
3.2.1 Cálculo da Altura de Líquido Des aerado sobre o Vertedor de Saída .....	103
3.2.2 Gradiente Hidráulico .....	105
3.2.3 Perda de Carga no Downcomer .....	105
3.2.4 Altura de Líquido Des aerado na Entrada do Prato .....	106
3.2.5 Altura de Líquido Des aerado no Downcomer.....	106
3.2.6 Altura de Espuma no Downcomer .....	107
3.2.7 Limites de Inundação .....	108
3.3 Projeto de Pratos com Borbulhadores Circulares .....	110
3.3.1 Projeto Preliminar .....	110
3.3.2 Escolha do Arranjo do Prato e dos Borbulhadores .....	111
Características dos Borbulhadores.....	111
3.3.3 Vertedores, Chicanas e Folgas .....	118
3.3.4 Limites de Inundação .....	120
3.4 Projeto de Pratos Valvulados.....	126
3.4.1 Projeto Preliminar .....	126
3.4.2 Escolha do Arranjo do Prato e do Número e Arranjo das Válvulas.....	130
3.4.3 Vertedores, Chicanas e Folgas .....	136

3.4.4 Limites de Inundação .....	137
3.5 Projeto de Pratos Perfurados .....	153
3.5.1 Projeto Preliminar .....	153
3.5.2 Escolha do Arranjo do Prato .....	154
3.5.3 Vertedores de Saída .....	155
3.5.4 Espaçamento Mínimo para Pratos Perfurados .....	156
3.5.5 Limites Operacionais .....	156
3.6 Torres de Chicanas .....	162
3.6.1 Capacidade .....	163
3.6.2 Queda de Pressão .....	165
3.6.3 Retenção de Líquido .....	166
3.6.3 Eficiência de Transferência de Massa .....	168
3.7 Condições de Projeto e Seleção do Tipo de Prato .....	170
3.7.1 Roteiro para Projeto de Pratos .....	174
3.7.2 Recomendações Especiais na Seleção do Tipo de Prato .....	176
3.8 Estimativa de Custo dos Internos .....	177
<b>NOMENCLATURA PARTICULAR DO CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>178</b>
<b>ÍNDICES .....</b>	<b>185</b>

#### *Capítulo 4*

<b>TORRES RECHEADAS .....</b>	<b>187</b>
Introdução .....	187
4.1 Distribuidores de líquido .....	188
4.1.1 Distribuidores com Chapa Perfurada e Chaminé .....	189
4.1.2 Distribuidores Tipo Vertedor de Chaminé e de Calha .....	195
4.1.3 Distribuidores com Tubos Perfurados .....	199
4.1.4 Distribuidores com Bicos Aspersores (Spray Nozzle) .....	200
4.1.5 Qualidade de Distribuição de Líquido .....	204
4.2 Distribuidor de Vapor .....	214
4.3 Grades-suporte .....	217
4.3.1 Grade de Injeção de Gás .....	218
4.3.2 Grade-suporte Simples .....	218
4.3.3 Grade-suporte Plana .....	219
4.4 Grade de Retenção (Hold-down grids) .....	219
4.5 Limitadores de Leito (Bed-limiters) e Redistribuidores de Líquido .....	220
4.6 Coletores de Líquido .....	222
4.6.1 Coletor com Chaminé .....	222
4.6.2 Coletor da Chevron .....	223
4.7 Tipos de Material e Aspectos de Seleção dos Internos e dos Recheios .....	225
4.7.1 Materiais Cerâmicos .....	226
4.7.2 Materiais Metálicos .....	226
4.7.3 Materiais Plásticos .....	227
4.7.4 Carvão .....	228
4.8 Escolha do Recheio .....	229
4.9 Grau de Molhamento em Torres Recheadas .....	231

4.10	Determinação do Diâmetro de Torres Recheadas . . . . .	233
4.10.1	Diâmetro pelo Critério de Afastamento da Condição de Inundação . . . . .	234
4.10.2	Diâmetro pelo Critério de Queda de Pressão Recomendada . . . . .	237
4.10.3	Diâmetro pelo Critério da Eficiência . . . . .	240
4.10.4	Diâmetro pelo Critério da Vazão Máxima de Líquido . . . . .	244
4.11	Queda de Pressão em Torres Recheadas . . . . .	245
4.11.1	Recheios Randômicos . . . . .	245
4.11.1.1	Queda de Pressão em Leitos Secos . . . . .	245
4.11.1.2	Queda de Pressão em Leitos Molhados . . . . .	246
4.11.2	Recheios Estruturados . . . . .	253
4.12	Retenção de Líquido em Torres Recheadas . . . . .	254
4.12.1	Recheios Randômicos . . . . .	254
4.12.1.1	Método de Shulman (1955) . . . . .	255
4.12.1.2	Método de Buchanan (1967) . . . . .	255
4.12.1.3	Método de Billet e Mackowiak (1984) . . . . .	255
4.12.1.4	Método de Takahashi (1979) . . . . .	255
4.12.1.5	Comparação dos Resultados com os Dados dos Fabricantes . . . . .	256
4.12.2	Recheios Estruturados . . . . .	257
4.13	Área Interfacial Efetiva . . . . .	257
4.13.1	Área Interfacial Efetiva sem Reação Química . . . . .	258
4.13.2	Área Interfacial Efetiva com Reação Química . . . . .	260
4.14	Coefficientes de Transferência de Massa . . . . .	260
4.14.1	Recheios Randômicos . . . . .	260
4.14.1.1	Equações de Shulman et alii (1955-1971) . . . . .	260
4.14.1.2	Correlação de Onda et alii (1968) . . . . .	261
4.14.1.3	Método de Bolles e Fair (1982) . . . . .	263
4.14.2	Recheios Estruturados . . . . .	266
4.15	Coefficientes de Troca Térmica em Leitos Recheados . . . . .	268
4.15.1	Analogia com a Correlação de Shulman . . . . .	268
4.15.2	Analogia com a Correlação de Onda* . . . . .	269
4.15.3	Analogia com a Correlação de Fair . . . . .	269

## Capítulo 5

<b>DESTILAÇÃO</b> . . . . .	<b>281</b>
Introdução . . . . .	281
Destilação integral . . . . .	281
Destilação diferencial ou em batelada . . . . .	282
Destilação fracionada . . . . .	283
Destilação extrativa e azeotrópica . . . . .	284
5.1 Equações Básicas . . . . .	288
5.2 Utilização dos Coeficientes Globais . . . . .	290
5.3 Eficiência do Recheio na Destilação – HETP . . . . .	297
5.3.1 HETP Através de Dados de Desempenho . . . . .	298
5.3.2 HETP Através de Métodos Empíricos . . . . .	298
5.3.3 HETP – Através de Planta Piloto . . . . .	301

5.3.4 HETP Através dos Modelos de Transferência de Massa .....	303
5.4 Procedimento Geral de Projeto para Torres Recheadas .....	306
5.5 Eficiência do Prato de Destilação .....	308
5.5.1 Definição de Eficiência .....	309
5.5.2 Correlações para o Cálculo da Eficiência Global .....	311
5.5.3 Correlações para o Cálculo da Eficiência de Murphree .....	314
5.5.4 Modelos Semiteóricos para o Cálculo da Eficiência .....	315
5.5.5 Parâmetros para o Cálculo da Eficiência .....	320
5.5.6 Cálculo da Eficiência em Sistemas Multicomponentes .....	320

## Capítulo 6

<b>ABSORÇÃO E ESGOTAMENTO .....</b>	<b>327</b>
6.1 Introdução .....	327
6.2 Equações Fundamentais para Cálculo da Altura de Recheio .....	331
6.2.1 Utilização dos Coeficientes Globais .....	335
6.3 Sistemas Simples Isotérmicos .....	336
6.3.1 Coeficientes Globais de Transferência de Massa .....	339
6.4 Aplicação dos Coeficientes Globais Empíricos de Transferências de Massa Específicos de Absorção .....	345
6.4.1 Correlação Empírica da Norton .....	345
6.5 Efeitos Térmicos na Absorção de Gás .....	349
6.5.1 Absorção e Esgotamento Adiabático em Torres Recheadas .....	352
6.5.2 Fundamentos Teóricos .....	353
6.5.2.1 Descrição de uma Absorvedora Recheada Adiabática .....	353
6.5.2.2 Mecanismos de Transporte Interfacial .....	354
6.5.2.3 Seção Diferencial de Recheio para um Sistema Adiabático Simples com Três Componentes para Absorção Física .....	355
6.6 Método Aproximado para Sistemas Complexos Multicomponentes Adiabáticos Recheados .....	360
6.6.1 Avaliação Simplificada .....	362
6.6.2 Avaliação pelo Método de Edmister .....	362
6.6.3 Comparação entre o Método Rigoroso e o Aproximado .....	362
6.7 Absorção com Reação Química .....	368
6.7.1 Cálculo da Taxa de Absorção, $RR_A$ .....	370
6.8 Dimensionamento de uma Absorvedora Recheada com Reação .....	373
6.9 Dimensionamento de uma Absorvedora Adiabática com Reação Química .....	379
6.10 Esgotamento de Gases .....	379
6.10.1 Desaeradores Contracorrente de Água Usando Gás Natural .....	380
6.10.2 Fundamentos .....	381
6.11 Eficiência dos Pratos na Absorção e Esgotamento de Gases .....	388

## Capítulo 7

<b>TROCA TÉRMICA .....</b>	<b>393</b>
Introdução .....	393
7.1 Equações Fundamentais .....	395
7.2 Sistemática Geral para o Cálculo da Altura .....	397

1. <i>Determinação do diâmetro da torre</i> .....	399
2. <i>Determinação da altura de recheio</i> .....	401
3. <i>Cálculo das condições de interface</i> .....	402
7.3 Caso Especial – Sistema Água-Ar .....	405
7.4 Sistemas Complexos .....	408
7.4.1 Método para Recheios Randômicos .....	410
7.4.2 Método para Recheios Estruturados .....	417
7.4.3 Método para Cálculo de Leitos Mistos .....	419
7.5 Transferência de Calor em Torres de Pratos ou Chicanas .....	420

### Capítulo 8

<b>EXTRAÇÃO LÍQUIDO-LÍQUIDO</b> .....	<b>423</b>
8.1 Especificação das Fases Dispersa e Contínua .....	424
8.2 Especificações do Distribuidor .....	425
8.3 Hidrodinâmica do Equipamento .....	430
8.3.1 Gotas Únicas - Velocidade Terminal .....	430
8.3.2 Capacidade e Diâmetro da Torre .....	432
8.3.3 Velocidade de Inundação .....	435
8.4 Condições de Operação .....	436
8.5 Torres Recheadas .....	437
8.5.1 Retenção da Fase Dispersa .....	439
8.5.2 Inundação .....	443
8.5.3 Altura de Leito Recheado .....	447
8.5.4 Dimensionamento Empírico – Critério da Norton .....	452
8.6 Torres de Pratos Perfurados .....	459
8.6.1 Hidrodinâmica .....	459
8.6.2 Retenção da Fase Dispersa .....	463
8.6.3 Altura Total da Torre de Pratos Perfurados .....	464
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>473</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>483</b>
<b>ÍNDICES</b> .....	<b>490</b>
<b>NÚMEROS ADIMENSIONAIS USADOS</b> .....	<b>491</b>
<b>TABELA DE CONVERSÃO DE UNIDADES</b> .....	<b>493</b>
<b>GLOSSÁRIO</b> .....	<b>499</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO</b> .....	<b>507</b>