

TEORIA E PRÁTICA DA PURIFICAÇÃO DE ÁGUA

VOLUME I

JORGE ARBOLEDA VALENCIA
IVAN A. BUITRAGO LEÓN
LUIS A. JARAMILLO GÓMEZ

Arboleda Valencia, Jorge, autor

Teoria e prática da purificação de água / Jorge Arboleda Valencia, Iván A. Buitrago León, Luis A. Jaramillo Gómez. -- Quarta edição. -- Bogotá: Ecoe Ediciones, 2024.

393 páginas. -- 2 volumes. -- (Ciências da terra, geografia, meio ambiente e planejamento. Abastecimento e tratamento de água)

Inclui curricula vitae dos autores -- Inclui bibliografia.

ISBN 978-958-503-887-5 (vol. 1, e-book)

Purificação da água 2. Qualidade da água - Controle 3. Química da água I. Buitrago León, Iván A., autor II. Jaramillo Gómez, Luis Alberto, autor

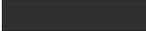
CDD: 628.162 ed.

23CO-BoBN- a1127010



Área: *Tecnologia, engenharia, agricultura, processos industriais*

Subárea: *Abastecimento e tratamento de água*

ECOE
EDICIONES


© Jorge Arboleda Valencia

© Iván A. Buitrago León

© Luis A. Jaramillo Gómez

© Ecoe Ediciones S.A.S.

info@ecoeediciones.com

www.ecoeediciones.com

Carrera 19 # 63 C 32

Telefone: (+57) 321 226 46 09

Bogotá, Colômbia

Primeira edição: Bogotá, janeiro de 2024

e-ISBN: 978-958-503-887-5

Diretora Editorial: Ana María Rueda G.

Coordenadora Editorial: Paula Bermúdez B.

Editora de aquisições: Alejandra Cely R.

Revisão: Tomás Collazos

Layout: Magda Barrero

Capa: Wilson Marulanda Muñoz

A reprodução total ou parcial por qualquer meio é proibida sem a permissão por escrito do detentor dos direitos autorais.

Todos os direitos reservados.

AGRADECIMENTOS

Os autores do livro expressam seus sinceros agradecimentos a todos aqueles que participaram da atualização e do ajuste das informações aqui incluídas, da revisão de fórmulas e da renovação de gráficos.

Entre eles, gostaríamos de destacar a participação da desenhista industrial María Camila Niño que, com todo o seu trabalho, nos ajudou a atualizar as imagens das edições anteriores e a adequá-las às novas tecnologias e padrões de desenho. Ao Sr. John Carlos López, pela revisão geral do livro, da formulação química e da nomenclatura utilizada. Ao engenheiro Andrés Dimas, pela revisão técnica de vários conceitos aqui apresentados. À engenheira Clara María Corzo, por sua revisão do projeto dos componentes da planta. E, em geral, a toda a equipe das empresas WARP SAS e Profit Eng. SAS pelo apoio desinteressado no desenvolvimento de gráficos, módulos, diagramas e na atualização desta nova edição.

ÍNDICE

ENCAMINHAR	xxv
Por MEIO DE UM prefácio	xxvii
CONSIDERAÇÕES HISTÓRICAS	xxix
Primeiro estágio do desenvolvimento da tecnologia de tratamento da água (1850-1900)	xxix
Segunda etapa do desenvolvimento do tratamento de água (1900-1950)	xxxi
FOCO DESTES LIVRO	xxxv
Soluções para os problemas levantados	xxxvii
Componentes físico-químicos do projeto	xxxvii
Componentes mecânicos	xxxviii
Componentes hidráulicos	xxxix
Componentes bacteriológicos	xl
Desenvolvimento progressivo das metas de potabilidade da água	xli
CAPÍTULO 1: CONCEITOS BÁSICOS DA QUÍMICA DA ÁGUA	1
Estrutura química e propriedades da água	2
Composição química da água	2
Forma da molécula (polaridade)	2
Estrutura molecular	
Ionização e solvatação	6
Dissociação da água	7
Algumas propriedades físicas da água	7
Substâncias dispersas na água	11
Teoria da coagulação	12

Coloides, classificação e propriedades	12
Forma dos coloides	14
Propriedades coloidais.....	14
Movimento browniano	14
Efeito Tyndall	15
Adsorção.....	15
Propriedades eletrocinéticas	15
Propriedades ópticas.....	18
Propriedades da superfície	19
Propriedades eletrocinéticas (eletrocinética).....	21
CAPÍTULO 2: TEORIA DA COAGULAÇÃO DA ÁGUA	25
Impurezas da água	25
Aspectos ópticos da turbidez.....	26
Meio de divulgação	27
Natureza química da turbidez	29
Natureza da cor	33
Tamanho da partícula de cor	33
Relação entre cor e pH	34
Comparação entre as características de cor e turbidez	35
Coagulação-floculação de impurezas na água.....	37
Mecanismos de adsorção-neutralização	38
Potenciais coloidais.....	38
Medições eletrocinéticas.....	40
Estabilidade e instabilidade de suspensões coloidais	41
Coagulação por neutralização de carga.....	42
Coagulação por compressão da camada dupla	43
Coagulação química de pontes.....	45
Coagulação por incorporação (ou varredura).....	45
Diagramas de coagulação-turbidez	49
Remoção de cor	50
Mecanismos de remoção de cor.....	53
Fatores que afetam o processo de coagulação	53
Coagulantes.....	53
Coagulantes e floculantes poliméricos (polieletrólitos)	54
Classificação dos polieletrólitos.....	55
Polímeros sintéticos	56
Classificação dos polímeros de acordo com sua carga.....	57
Modos de uso de polieletrólitos.....	58
Coagulantes metálicos	58
Coagulação com sais de alumínio	59
Química de coagulação com Al(III)	62
Coagulação com sais de ferro	63
Química da coagulação com sais de ferro.....	65
Supercoagulação ou coagulação de orgânicos	65
Declaração do problema.....	67
Limites permissíveis para substâncias orgânicas na água	69

Mecanismos de remoção.....	69
Transporte de partículas - cinética da floculação.....	73
Geral.....	73
Interação entre partículas na floculação pericinetica	

ou na subfaixa viscosa.....	74
Interação entre partículas na floculação ortocinética ou na subfaixa inercial.....	75
Escalas de vórtices e colisões de partículas.....	78
Expressões de gradiente de velocidade.....	79
Expressões baseadas na teoria de Von Smowluchowski.....	83
Modelo de Argaman e Kaufman.....	84
Modelo Hudson.....	86
Floculação com lastro.....	87
Fundamentos teóricos e equações básicas.....	87
Características das plantas de floculação com lastro.....	90
CAPÍTULO 3: PROJETO DO MISTURADOR E DO FLOCULADOR.....	93
Adição de coagulantes.....	93
Preparação de soluções.....	94
Método de dosagem de compostos químicos.....	101
Sistemas de dosagem de solução por gravidade.....	103
Aplicadores de cal.....	108
Cálculo da quantidade de reagente a ser dispensada.....	110
Dispersão de coagulantes.....	111
Relação entre o tipo de coagulação e a dispersão de coagulantes.....	112
Mistura no caso de coagulação por adsorção-desestabilização.....	112
Mistura no caso de coagulação por varredura.....	113
Gradientes ideais para mistura rápida.....	114
Métodos para mistura rápida.....	114
Cinética de mistura rápida.....	126
Mistura rápida em tubulações pressurizadas.....	131
Aglutinação de partículas.....	137
Concentração volumétrica de flocos.....	138
Classificação dos floculadores.....	140
Floculadores hidráulicos.....	140
Floculadores mecânicos.....	159
Floculador hiperbólico.....	171
Floculadores hidromecânicos.....	173
CAPÍTULO 4 CONTROLE DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO.....	181
Sistemas de simulação de processos de coagulação.....	182
Determinação da dosagem ideal de coagulante.....	183
Aparelho para teste de frascos.....	183
Turbidímetro.....	184
Comparador de cores.....	185
Medidor de pH.....	185
Vidraria.....	185

Reagentes.....	186
Termômetro.....	186
Procedimento de teste.....	186
Determinação da velocidade de assentamento de partículas.....	194
Procedimento.....	194
Determinação da influência do pH na coagulação.....	196
Procedimento.....	196

Determinação da importância da mistura rápida por meio de testes segregação	198
Procedimento.....	198
Determinação da influência da concentração da solução de coagulantes tem sobre a coagulação.....	199
Procedimento.....	199
Determinação do gradiente ideal e do tempo de detenção.....	201
Procedimento.....	201
Generalização dos dados de teste de jarros	205
Comparação entre os testes em frascos e o comportamento na fábrica de tratamento	207
Procedimento.....	208
Avaliação da eficiência dos assistentes de coagulação	211
Procedimento.....	212
Outros sistemas de controle de coagulação-floculação	213
Determinação de cargas eletrostáticas.....	213
Sistemas de medição da filtrabilidade da água.....	218
CAPÍTULO 5: TEORIA DA SEDIMENTAÇÃO DA ÁGUA.....	221
Classificação dos processos de clarificação por sedimentação	222
Decantação de partículas isoladas em um fluido em repouso	224
Forças atuantes	224
Taxa de sedimentação terminal	226
Caso das partículas esféricas.....	227
Valores do coeficiente de arrasto CD.....	227
Partículas não esféricas.....	229
Decantação de partículas isoladas em um fluido em movimento	235
Divergências entre o tanque ideal e os tanques reais.....	239
Sedimentação de fluxo vertical	242
Noções básicas de manta de lodo.....	242
Velocidade de assentamento da interface	244
Porosidade e concentração do manto.....	245
Influência do tipo de floco influente.....	247
Fluxo laminar ou sedimentação de alta taxa.....	249
Considerações sobre o regime de fluxo	253
Equação básica de cálculo.....	255
Interpretação da equação de velocidade crítica.....	256
Índice de eficiência angular	258
Relação profundidade/eficiência	260
Eficiência dos decantadores de placas.....	261

CAPÍTULO 6: PROJETO DO COLONO.....	267
Tanques de decantação convencionais	267
Zona de sedimentação - fatores a serem considerados.....	267
Área de entrada.....	271
Área de saída.....	276
Área de lodo.....	280
Decantadores de fluxo vertical e decantadores de manta de lodo.....	281
Desenvolvimento de decantadores de fluxo vertical.....	281
Classificação dos decantadores de manta de lodo.....	283
Cargas de superfície e velocidades ascendentes	283
Unidades com manta de suspensão hidráulica.....	284

Unidades com manta de suspensão mecânica	285
Eficiência dos clarificadores de manta de lodo.....	288
Tanques de decantação de fluxo laminar	291
Cargas de superfície	291
Materiais de construção e formato	292
Sistema de entrada	293
Sistema de saída.....	297
Zona de lodo	299
Outros sistemas de decantação de alta taxa.....	300
Sedimentação acelerada com placas profundas	303
Aspectos gerais	303
Método de cálculo	304
Comparação das duas tecnologias.....	307
Placas estreitas	307
Placas profundas.....	307
Conclusões	308
Gerenciamento de lodo	309
Tratamento e descarte de lodo	311
Volume total de lodo sedimentado esperado.....	311
Volume de lodo após a compactação nos espessadores com a ajuda de de polímeros.....	312
Peso da lama seca	312
Descarte final de lodo	314
Exemplo de cálculo	316
Tipos de evacuação	318
Design da tremonha.....	328
Métodos de descarga intermitente.....	339
Tubulações de extração com velocidades mínimas de arraste de polpa.....	340
Flotação	341
Introdução.....	341
Descrição do processo	341
Teoria da flotação.....	342
Projeto de unidades de flotação	344
Resultados de flotação	346

XII TEORIA E PRÁTICA DA PURIFICAÇÃO DA ÁGUA

CAPÍTULO 7: CONTROLE DO PROCESSO DE SEDIMENTAÇÃO	349
Testes de eficiência.....	349
Estudo estatístico dos dados de desempenho do tanque de decantação.....	354
Interpretação dos resultados obtidos na análise estatística dos dados operacionais dos classificadores de La Atarjea	361
Estudo de depósitos de lodo.....	362
a) Em tanques de fluxo horizontal.....	362
b) Em tanques de fluxo vertical	365
Determinação do volume e do peso seco do lodo produzido	371
Primeira etapa	371
Segunda etapa.....	372
Etapa três.....	372
Colunas de sedimentação	372
Testes de rastreamento	374
Histórico.....	374
Substâncias traçadoras	374
Procedimento	

Análise de curvas	377
Interpretação dos resultados	379
Limitações dos testes de traçadores.....	380
BIBLIOGRAFIA	383

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1: Noções básicas de química da água

Figura 1.1. Estrutura e dimensões da molécula de hidrogênio	4
Figura 1.2. Estrutura molecular da água	5
Figura 1.3 Posição das moléculas de gelo correspondentes a três cenários diferentes	5
Figura 1.4. Representação octaédrica de íons hidratados Alumínio $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+++}$	6
Figura 1.5. Tamanho das partículas em suspensão	12
Figura 1.6. Classificação dos coloides	13
Figura 1.7. A forma mais comum de partículas coloidais	14
Figura 1.8. Representação do coloide	16
Figura 1.9. Potencial z	17
Figura 1.10. Idealização dos fenômenos de adsorção	20
Figura 1.11. Substituição isomórfica	22
Figura 1.12. Adsorção preferencial	22

Capítulo 2: Teoria da coagulação da água

Figura 2.1 Interferência de ondas	26
Figura 2.2. Esquema simplificado de interferência e dispersão de luz	27
Figura 2.3 Ângulo de dispersão máxima da luz	28
Figura 2.4 Turbidez de uma amostra de água preta sedimentada e filtrada (de acordo com S. Hannah)	28

Figura 2.5 Átomo de alumínio.....	30
Figura 2.6. Átomo de silício	30
Figura 2.7. Formas das argilas vistas ao microscópio. (desenhos feitos a partir de microfotografias).....	30
Figura 2.8. Formas das argilas vistas ao microscópio. (desenhos feitos a partir de microfotografias).....	31
Figura 2.9. Nomogramas de Singley, Harrtas e Maulding. para a determinação da cor com pH	34
Figura 2.10. Velocidade de sedimentação de partículas discretas S=II,65, T=15 °C	35
Figura 2.11. Helmholtz	37
Figura 2.12. Popa.....	37
Figura 2.13. Gouy Chapman.....	37
Figura 2.14. Movimento de partículas carregadas em um fluido	39
Figura 2.15. Fotografia de microscópio eletrônico de bactérias coaguladas com sulfato de alumínio.....	41
Figura 2.16. Adsorção de contra-íons na partícula coloidal.....	42
Figura 2.17. Adsorção de polímeros em uma partícula de caulinita.....	43
Figura 2.18. Zonas de coagulação de turbidez de acordo com os estudos de Amirtharajah e Mills para diferentes doses de sulfato de alumínio. em diferentes pHs	46
Figura 2.19. Diagramas de coagulação obtidos experimentalmente para águas com turbidez de 200 UNT, cor verdadeira de 5 c.u. e 30 mg/l de alcalinidade com pH inicial de 7,5 (de acordo com Campos e Di Bernardo)	47
Figura 2.20. Porcentagem de turbidez residual para diferentes dosagens de coagulantes aplicados e diferentes pHs da água misturada	48
Figura 2.21. Dose de Al(III) necessária para remover 50% do de cor e turbidez da água	49
Figura 2.22. Efeito do sulfato férrico na coagulação da água B e C em pH constante (de acordo com Black et al.)	51
Figura 2.23. Dose mínima de sulfato férrico em função da cor da água bruta.....	51
Figura 2.24. Adsorção de cor produzida pelos produtos poliméricos hidrólise de coagulantes.	52
Figura 2.25. Domínios de remoção de cor (ácido húmico inicial), 4 mg/l (100 cu); turbidez, 27-30 UNT.) (De acordo com Amirtharajah)	52
Figura 2.26. Exemplos de polieletrólitos	57
Figura 2.27. Modos de ação dos polieletrólitos	58
Figura 2.28. Produtos de hidrólise formados pela reação do alumínio com água e alcalinidade.....	60
Figura 2.29. Potencial zeta das partículas de caulinita em diferentes pHs. (De acordo com Hall e Packham).....	62
Figura 2.30. Coagulação de ferro	64
Figura 2.31. Perfil do teste do jarro para Groton, Connecticut.....	68
Figura 2.32. Perfil do teste de jarro para Tampa, Flo.....	69

Figura 2.33. Adsorção de coloides de TOC em partículas de hidróxido de alumínio precipitado	69
Figura 2.34. Remoção de turbidez e TOC em pH=5,5 e pH=7,2	71
Figura 2.35. Dosagem de TOC e sulfato de alumínio na água do Lago Silver	71
Figura 2.36. TOC versus dosagem de coagulantes metálicos, de acordo com Krasner e Gary	72
Figura 2.37. Turbidez e TOC para diferentes doses de sulfato de alumínio em Raleigh, N.H.....	73
Figura 2.38. Interação entre duas partículas.....	75
Figura 2.39. Idealização da turbulência criada na parte traseira de um cilindro introduzido em um líquido	76
Figura 2.40. Velocidade versus tempo gasto em um ponto específico do campo turbulento (de acordo com Casson e Lauler (1990)).....	76
Figura 2.41. Estágios no desenvolvimento da turbulência em um fluxo passando em velocidades crescentes ao redor de um cilindro (de acordo com Prandtl, 1927)	76
Figura 2.42. Idealização das escalas de turbulência	79
Figura 2. 43. Fotografias de um processo de floculação a 0,5, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10 e 10. e 30 minutos, de acordo com Hanson e Cleasby (1990)	80
Figura 2.44. Gradientes de velocidade para diferentes potências dissipadas dependendo da escala de turbulência a ser considerada	82
Figura 2.45. Inter-relação teórica entre o diâmetro da partícula, escala de turbulência e eficiência de floculação	82
Figura 2.46. Esquema de diferentes rolos de vórtice, que saturam a mesma área	82
Figura 2.47. Efeito da compartimentalização em floculadores.....	84
Figura 2.48. Valores de N_0 e N_t para diferentes gradientes de velocidade na floculação convencional.....	88
Figura 2.49. Valores de N_t para diferentes gradientes de velocidade em floculação com lastro.....	89
Figura 2.50. Diagrama de fluxo de uma usina com floculação com lastro	91

Capítulo 3: Projeto do misturador e do floculador

Figura 3.1 Solubilidade em água do $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ em diferentes temperaturas.....	94
Figura 3.2 Tanques de armazenamento de sulfato de alumínio líquido	96
Figura 3.3. pH das soluções de sulfato de alumínio	98
Figura 3.4. pH das soluções de cloreto férrico $T=20^\circ C$	99
Figura 3.5. Fotografia do equipamento da usina Wiesner	101
Figura 3.6. Unidade de dosagem com orifício ajustável.....	104
Figura 3.7. Unidade de medição de orifício variável com carga fixa. Modelo integrado	105
Figura 3.8. Dispensador de orifício fixo - modelo separado.....	106
Figura 3.9. Modelo integrado ao dispensador de orifício fixo.....	106

Figura 3.10. Dispensador com nível constante e orifício ajustável	106
Figura 3.11. Dispensador do tipo Roto-dip.....	107
Figura 3.12. Proporcionador com bomba centrífuga.....	107
Figura 3.13. Dispensador Roto-dip	108
Figura 3.14. Saturador de cal	109
Figura 3.15. Unidade de dosagem para suspensão de cal.....	110
Figura 3.16. Efeito da alteração do ponto de aplicação de $Al_2(SO_4)_3$ e o uso de difusores em Springwell's	113
Figura 3.17. Dimensões da calha Parshall.....	116
Figura 3.18. Calha Parshall com açude regulador na saída	120
Figura 3.19. Testes em calhas Parshall mostrando como a turbulência penetra pouco na água quando o lençol está alto e como ocorre pouca penetração. quando está baixo.....	121
Figura 3.20. Represa como misturador	121
Figura 3.21. Represa com crista larga para mistura rápida	122
Figura 3.22. Misturador estático para inserção de tubos	123
Figura 3.23. Perfil de concentração do coagulante na dosagem	123
Figura 3.24. Misturador de crista larga ou de crista larga	124
Figura 3.25. Misturador de calha Parshall com turbulência estendida.....	124
Figura 3.26. Sistemas de injeção de coagulante na tubulação de afluentes	125
Figura 3.27. Misturadores traseiros mecânicos.....	125
Figura 3.28. Misturadores hidráulicos traseiros.....	126
Figura 3.29. Valores de K para diferentes larguras de partições refletoras	128
Figura 3.30. Gradientes de velocidade para vários valores de potência. unidade dissipada.....	129
Figura 3.31. Seção da estrutura de conexão para mistura lenta.....	133
Figura 3.32. Estrutura de mistura rápida	134
Figura 3.33. Porcentagem de água e volume de flocos para diferentes gradientes	139
Figura 3.34. Floculadores de partição hidráulica	140
Figura 3.35. Fotografia de um floculador de septo.....	142
Figura 3.36. Gradiente de velocidade em floculadores de partição	143
Figura 3.37. Gradiente de energia em misturadores de fluxo horizontal.....	144
Figura 3.38. Floculador de fluxo vertical.....	147
Figura 3.39. Floculador tipo Alabama.....	151
Figura 3.40. Floculador Cox.....	152
Figura 3.41. Floculador de porosidade média (extraído de Richter)	156
Figura 3.42. Resultados da floculação com malhas	157
Figura 3.43. Floculadores mecânicos na fábrica de La Reforma em Cali, Colômbia.....	159
Figura 3.44. Floculadores de eixo vertical.....	160
Figura 3.45. Floculador de palhetas de eixo horizontal	160
Figura 3.46. Diferentes arranjos de agitador de pás para floculadores	160

Figura 3.47. Floculadores de turbina.....	161
Figura 3.48. Diferentes projetos de floculadores	162
Figura 3.49. Floculadores de pá horizontal com câmaras de passagem inferior.....	165
Figura 3.50. Corte de um floculador rotativo	167
Figura 3.51. Floculador oscilante (Carter Company)	169
Figura 3.52. Diagrama esquemático de um agitador alternativo	170
Figura 3.53. Floculador de ida e volta	170
Figura 3.54. Turbina hiperbólica.	171
Figura 3.55. Turbina hiperbólica CDF.	172
Figura 3.56. Localização da turbina na câmara de floculação.....	172
Figura 3.57. Esquema de um floculador hidromecânico.....	173
Figura 3.58. Floculadores alternativos de balancim.....	174
Figura 3.59. Esquema do floculador alternativo com pontos mecânicos relevantes.....	176
Figura 3.60. Comportamento das velocidades ascendentes em floculador alternativo.....	176
Figura 3.61. Meio ciclo de operação.....	177

Capítulo 4: Controle do processo de coagulação-floculação

Figura 4.1. Aparelho de agitação para o teste de jarro manual com iluminação da base e de um jarro removido.....	183
Figura 4.2. Aparelho de teste do jarro operacional automático (cortesia da Warp SAS).....	184
Figura 4.3. Comparador para estimar o tamanho do floco produzido na coagulação (deaco rdo com a WRA)	189
Figura 4.4 Gradiente de velocidade para um béquer 2 litros com ou sem defletores, como segue	189
Figura 4.5. Aparelho para extrair a turbidez residual	190
Figura 4.6. Sistema de sifão	190
Figura 4.7. Gradientes de velocidade para jarros quadrados.....	191
Figura 4.8. Determinação da dosagem ideal de sulfato de alumínio para a água do Rio das Velhas (Belo Horizonte, Brasil).....	192
Figura 4.9. Flocos removidos em diferentes tempos de sedimentação (rio Rimac, Lima)....	196
Figura 4.10. Efeito do pH da água bruta para a mesma dosagem de sulfato de alumínio na fábrica de San Antonio - Cali, Colômbia.....	197
Figura 4.11. Teste de segregação	199
Figura 4.12. Influência da concentração da solução coagulante	201
Figura 4.13. Tempos ideais de floculação e gradientes de velocidade	204
Figura 4.14. Modelo matemático de Argaman e Kaufman.....	205
Figura 4.15. Remoção de turbidez para diferentes gradientes.....	206
Figura 4.16. Remoção de turbidez para diferentes gradientes.....	207

Figura 4.17. Determinação da velocidade de consumo de energia Velocidade da palheta = 0,882 rpm.....	209
Figura 4.18. Controle do processo de coagulação-floculação.....	210
Figura 4.19. Comportamento dos polieletrólitos com água del río Rimac, Lima, Peru	213
Figura 4.20. Conjunto de equipamentos do medidor Zeta	214
Figura 4.21. Célula de Briggs (vidro)	215
Figura 4.22. Cella de Riddick (plástico).....	215
Figura 4.23. Célula para medir o potencial de corrente de uma suspensão	217
Figura 4.24. Método de controle automático de coagulação.....	217
Figura 4.25. Célula para medir o potencial de corrente de uma suspensão	218

Capítulo 5. Teoria da sedimentação da água

Figura 5.1. Modelos de decantadores de flocos de acordo com a direção do fluxo	223
Figura 5.2. Forças que atuam em uma partícula	225
Figura 5.3. Movimento de partículas em um fluido com alto NR	225
Figura 5.4. Coeficiente de arrasto	227
Figura 5.5. Fluxograma para o cálculo da taxa de sedimentação.....	232
Figura 5.6. Velocidade de assentamento e flutuação	233
Figura 5.7. Fluxograma.....	233
Figura 5.8. Sedimentação de uma partícula em movimento horizontal	235
Figura 5.9. Fluxo oblíquo	236
Figura 5.10. Taxa de sedimentação crítica	236
Figura 5.11. Sedimentação convencional	237
Figura 5.12. Taxa de sedimentação	237
Figura 5.13. Sedimentação crítica	238
Figura 5.14. Correntes térmicas de densidade (seção transversal do tanque)	240
Figura 5.15. Correntes de densidade por concentração	241
Figura 5.16. Suspensão concentrada.....	244
Figura 5.17. Velocidade de descida	245
Figura 5.18. Porosidade de um manto de partículas suspensas em função de A taxa de subida.....	248
Figura 5.19. Velocidade de assentamento da interface vs. para diferentes valores de v_i	248
Figura 5.20. Velocidade de sedimentação da interface para mantas de lodo. de diferentes densidades.....	249
Figura 5.21. Sedimentação em tanques de decantação.....	250
Figura 5.22. Relações geométricas em um decantador inclinado	251
Figura 5.23. Desenvolvimento de fluxo laminar na entrada de um tubo.....	253
Figura 5.24. Perfil de velocidades entre duas placas paralelas para um fluxo que tem uma velocidade média de $v = 0,24$ cm/s espaçamento entre placas = 5 cm concentração de lodo = 20 %	254

Figura 5.25. Comparação entre a carga equivalente calculada com a equação (V.54) e a turbidez removida	259
Figura 5.26. Eficiência vs. razão angular.....	260
Figura 5.27. Comparação entre a carga de superfície calculada com equação (V.54) e a turbidez removida pela variação de L/e	260
Figura 5.28. Eficiência vs. relação l/d	261
Figura 5.29. Comparação entre a eficiência de um decantador convencional e uma das placas inclinadas, Guayaquil, Equador	262
Figura 5.30. Eficiência do tanque de decantação de placas em Prudentópolis, Brasil, trabalhando com uma carga de $185\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ equivalente a $26\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$	263
Figura 5.31. Comparação entre a turbidez obtida no teste e a obtida nos decantadores de placas. de Prudentópolis, Brasil.....	264
Figura 5.32. Eficiência do decantador de placas na estação de tratamento. de Cochabamba para uma velocidade de fluxo ascendente de $76\text{m}/\text{dia}$	264
Figura 5.33. Eficiência dos tanques de decantação de placas de Cochabamba, Bolívia, em 1, 2 e 3 de maio de 1976, quando houve variações acentuadas. na qualidade da água bruta.....	265
Figura 5.34. Turbidez da água bruta e decantada nos tanques de decantação em comparação com tanques de decantação convencionais.....	266

Capítulo 6: Projeto do colono

Figura 6.1. Tanques de decantação horizontais.....	269
Figura 6.2. Velocidade horizontal v_h para diferentes proporções: comprimento-profundidade L/h da zona de sedimentação	270
Figura 6.3. Paredes duplas	272
Figura 6.4. Para entradas submersas	274
Figura 6.5. Efeito da barragem de saída nas linhas de fluxo em um decantador	276
Figura 6.6. Estruturas de saída em tanques de decantação retangulares.....	278
Figura 6.7. Recipientes para água decantada.....	279
Figura 6.8. Ponte de barril das bacias de sedimentação do Estação de tratamento de Tibitó, Bogotá, Colômbia.....	281
Figura 6.9. Tanque de Dortmund (1880)	282
Figura 6.10. Clarificador com fundo cônico	284
Figura 6.11. Colonizador de Bacchus Marsh	284
Figura 6.12. Tanque de decantação BRNO, Tchecoslováquia	285
Figura 6.13. Botão de pressão Degremont.....	286
Figura 6.14. O Acelerador-Infilco, Inc.	287
Figura 6.15. Tanque de decantação.....	288
Figura 6.16. Fluxo em um cone.....	290
Figura 6.17. Distribuição da turbidez em uma estação de tratamento para $4\text{m}^3/\text{s}$. sem coletor de entrada	295

Figura 6.18. Distribuição de fluxo em um decantador de placas com velocidade de entrada de 0,82 cm/s.....	296
Figura 6.19. Diagrama esquemático de um novo decantador de alta taxa com canal de distribuição e tremonhas.....	297
Figura 6.20. Diagrama de velocidade na zona de lama entre duas placas planas.....	298
Figura 6.21. Decantador de placas.....	298
Figura 6.22. Decantador de placas de fluxo horizontal.....	300
Figura 6.23. Decantador de placas de fluxo descendente.....	302
Figura 6.24. Colonizadores de placa estreita comparados com decantadores de placas profundas (exemplo de cálculo).....	304
Figura 6.25. Decantador laminar com placas profundas.....	308
Figura 6.26. Leito de secagem de lodo a vácuo.....	318
Figura 6.27. Sistemas de remoção de lodo.....	320
Figura 6.28. Vista isométrica do coletor de sifão flutuante Clari-Vac lodo (sistema de dois coletores).....	321
Figura 6.29. Esquema de um sistema convencional.....	322
Figura 6.30. Configuração do varredor de lama de fundo acionado com motor e corrente.....	322
Figura 6.31. Configuração do varredor de lodo de fundo operado hidraulicamente com braço hidráulico (<i>Nordic Water</i>).....	323
Figura 6.32. Lodo transportado em base úmida em diferentes Ls.....	325
Figura 6.33. Lodo seco transportado em diferentes concentrações.....	325
Figura 6.34. Sistema de coleta de lodo Trac-Vac.....	327
Figura 6.35. Configuração da tremonha.....	329
Figura 6.36. Definição da esfera de influência da velocidade.....	330
Figura 6.37. Efeito da baixa velocidade de arrasto dos orifícios.....	331
Figura 6.38. Distribuição de fluxo para um coletor de extração considerando diferentes valores de R.....	332
Figura 6.39. Exemplo.....	335
Figura 6.40. Diâmetros e número de furos para diferentes comprimentos do coletor $v_a = 0,01$ m/s, $h = 4,0$ e $5,0$, $R = 0,42$ a $0,45$ m.....	335
Figura 6.41. Doses de sulfato de alumínio para várias turbidez da água bruta em San Antonio (Cali), Guandú (Rio), La Atarjea (Lima) e Cuenca (Cuenca).....	338
Figura 6.42. Válvulas de remoção de lodo tipo PIC ou válvulas de manga.....	340
Figura 6.43. Esquema de um processo de flotação.....	343
Figura 6.44. Quantidade de ar rico em nitrogênio dissolvido como uma função da pressão e da temperatura.....	344

Capítulo 7: Controle do processo de sedimentação

Figura 7.1. Coluna de sedimentação	351
Figura 7.2. v_s = velocidades de assentamento	351
Figura 7.3. Controle do processo de sedimentação	353
Figura 7.4. Análise estatística dos dados operacionais do Decanteres na fábrica de La Atarjea, em Lima, Peru.....	360
Figura 7.5. Dosagem de sulfato de alumínio para vários níveis de turbidez tratamento de água bruta em San Antonio em Cali, Guandu no Rio, La Atarjea em Lima e Cuenca em Cuenca.....	360
Figura 7.6. Decantador	363
Figura 7.7. Aparelho para determinar a topografia dos depósitos de lodo	364
Figura 7.8. Topografia de um perfil de lodo na estação de tratamento de Quito.	365
Figura 7.9. Aparelho para amostragem de uma manta de lodo	366
Figura 7.10. Velocidade de assentamento de uma interface de manta de lodo	367
Figura 7.11. Aparelho para amostragem da manta de lodo no decantadores de fluxo vertical	368
Figura 7.12. Concentração do manto em várias taxas de subida	369
Figura 7.13. Clarificadores experimentais: esquema de uma planta piloto de sedimentação vertical	373
Figura 7.14. Resultado do teste de traçador nos decantadores. da estação de tratamento de San Antonio em Cali, Colômbia.....	377
Figura 7.15. Controle do processo de sedimentação.....	378
Figura 7.16. Chegada do ensaio de traçador (13 de novembro de 1972) do traçador na saída do decantador	381

Sistema de informações on-line



No final do livro, você encontrará o código para entrar no **Sistema de Informações Online - SIL**.
- onde você poderá acessar apresentações em Power Point de cada capítulo, para uso de professores e do público em geral.

PARA FRENTE

"A água é tão essencial tanto para a criação animal quanto para a vegetal, seja para alimentação ou para outros fins, que sua importância provavelmente supera a de qualquer outra substância entre a grande exuberância concedida pelo benéfico autor da natureza. A saúde, o conforto e o prazer da humanidade exigem constantemente um suprimento abundante e, portanto, se a utilidade for um critério justo de valor, as invenções e operações para fornecê-la pronta e abundantemente em um estado claro e salubre parecem ter direito a uma atenção especial".

W. Matthews 1835

Em nossa profissão, às vezes somos favorecidos por um profissional que se dedica a transmitir ao restante de nós, jovens e idosos, os benefícios de sua experiência. Com menos frequência ainda, somos favorecidos por um profissional que dedicou sua vida a uma compreensão profunda dos fatores que influenciam muitas de nossas decisões e projetos, e depois os colocou em prática. Jorge Arboleda-Valencia é um desses profissionais. Seu livro transmite essa profundidade de conhecimento que poucos de nós têm a sorte de ter.

Há muito tempo eu gosto da primeira edição e esperava ansiosamente por essa expansão do texto. Aprecio o esforço que ele exigiu e recomendo seu conteúdo a todos que desejam aprender mais sobre nosso campo e, particularmente, àqueles que usarão esse conhecimento para o aprimoramento de nossa profissão. Seu trabalho afetou profundamente os projetos na América Latina e em todo o mundo. É um grande privilégio endossar sua mensagem.

J. Edward Singley, Ph.D.

Presidente da
AWWA Vice-Presidente, James M.
Montgomery, Inc.
Gainesville, Flórida