



SIDNEY SECKLER FERREIRA FILHO

TRATAMENTO DE ÁGUA

Concepção, projeto e operação
de estações de tratamento

Um guia prático
**PARA ALUNOS E
PROFISSIONAIS**

ELSEVIER

**Material
na WEB**

www.evolution.com.br



TRATAMENTO DE ÁGUA
**CONCEPÇÃO, PROJETO E OPERAÇÃO
DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO**

SIDNEY SECKLER FERREIRA FILHO

ELSEVIER

© 2017, Elsevier Editora Ltda.

Todos os direitos reservados e protegidos pela Lei nº 9.610, de 19/02/1998.

Nenhuma parte deste livro, sem autorização prévia por escrito da editora, poderá ser reproduzida ou transmitida sejam quais forem os meios empregados: eletrônicos, mecânicos, fotográficos, gravação ou quaisquer outros.

ISBN: 978-85-352-8740-0

ISBN (versão eletrônica): 978-85-352-8810-0

Capa: Vinicius Dias

Edição Eletrônica: Thomson Digital

Copidesque: Jacqueline Gutierrez

Revisão: Gabriel Pereira

Elsevier Editora Ltda.

Conhecimento sem Fronteiras

Edifício City Tower. Rua da Assembleia, 100 – 6º andar – Sala 601 –
20011-904 – Centro – Rio de Janeiro – RJ

Rua Quintana, 753 – 8º andar
04569-011 – Brooklin – São Paulo – SP

Serviço de Atendimento ao Cliente

0800-026 5340

atendimento1@elsevier.com

Consulte nosso catálogo completo, os últimos lançamentos e os serviços exclusivos no site www.elsevier.com.br

Nota: Muito zelo e técnica foram empregados na edição desta obra. No entanto, podem ocorrer erros de digitação, impressão ou dúvida conceitual. Em qualquer das hipóteses, solicitamos a comunicação ao nosso Serviço de Atendimento ao Cliente, para que possamos esclarecer ou encaminhar a questão.

Para todos os efeitos legais, a Editora, os autores, os editores ou colaboradores relacionados a esta obra não assumem responsabilidade por qualquer dano/ou prejuízo causado a pessoas ou propriedades envolvendo responsabilidade pelo produto, negligência ou outros, ou advindos de qualquer uso ou aplicação de quaisquer métodos, produtos, instruções ou ideias contidos no conteúdo aqui publicado.

CIP-BRASIL. CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO
SINDICATO NACIONAL DOS EDITORES DE LIVROS, RJ

F441t

Ferreira Filho, Sidney Seckler

Tratamento de água : concepção, projeto e operação de estações de tratamento /
Sidney Seckler Ferreira Filho. – 1. ed. – Rio de Janeiro : Elsevier, 2017.

il. ; 27 cm.

Inclui bibliografia

ISBN: 978-85-352-8740-0

1. Engenharia hidráulica. 2. Abastecimento de água. I. Título.

17-42215

CDD: 627

CDU: 627



SOBRE O AUTOR

Sidney Seckler Ferreira Filho

Engenheiro Civil formado pela Escola Politécnica da USP (1988). Mestre em Engenharia Hidráulica e Sanitária pela Escola Politécnica da USP (1993). Doutor em Engenharia Hidráulica e Sanitária pela Escola Politécnica da USP (1996). Professor Associado do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da USP, exercendo atividades de docência e pesquisa desde 1989 e com participação em mais de vinte cinco anos de atividades profissionais na área de Saneamento, envolvendo inúmeros estudos de concepção, projeto, dimensionamento e operação de estações de tratamento de águas de abastecimento para companhias de saneamento públicas e privadas no Brasil e América Latina.

DEDICATÓRIA

À minha querida e amada esposa, Ligia Hiromi Uegama Ferreira, que Deus permita que os ventos sempre unam nossos caminhos e corações em direção à eternidade.

Aos nossos queridos filhos, Laura Nami e Guilherme Dai, presentes que Deus nos encaminhou e que são as luzes de nossas vidas.

Dai de graça o que de graça recebeste

AGRADECIMENTOS

Às famílias, que recebem e acolhem, instruem, abraçam e esclarecem, e são sempre o porto seguro em nossas jornadas evolutivas.

Ao professor Kokei Uehara, exemplo de ser humano e de mestre, que me ensinou o amor à docência e cujos ensinamentos são sempre a luz correta e segura nos momentos de dificuldades.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, em especial aos colegas do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, pelas incontáveis horas de convívio e aprendizado. Aos inúmeros alunos de graduação e pós-graduação, que sempre lançaram questionamentos inquietantes, me incentivando a estudar mais e seguir adiante.

Às diversas empresas de saneamento, em especial, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp), por permitirem a realização de estudos e investigações experimentais nas dependências de suas estações de tratamento de água e que hoje enriquecem este livro com numerosos exemplos e estudos de caso.

Aos engenheiros, técnicos e profissionais que trabalharam e ainda trabalham na estação de tratamento de água do Guarará (Sabesp) – onde tudo começou, em 1990 –, pelo aprendizado em escala real dos problemas vivenciados na operação de estações de tratamento de água.

PREFÁCIO

Escrever um livro não é uma tarefa fácil, no entanto, pode-se tornar muito prazerosa quando os objetivos que a nortearam são claramente definidos.

Uma das perguntas mais comuns que fazemos quando se decide escrever um livro são quais serão os seus diferenciais em relação aos já existentes no mercado. Os livros mais tradicionais que versam sobre o tratamento de águas de abastecimento público são normalmente divididos em duas categorias. As primeiras são aquelas que se concentram nos fundamentos básicos de processos e nas operações unitárias que compõem o tratamento de águas de abastecimento, não abordando com profundidade aspectos de projeto e operação. A segunda categoria enfoca com mais profundidade aspectos de projeto, mas com pouco conteúdo teórico e de fundamentação de processos unitários. Dessa maneira, a proposta é possibilitar uma junção de ambos, ou seja, um livro que viabilize um correto e seguro dimensionamento das unidades de tratamento, sem que sejam abandonadas ou desconsideradas as razões e justificativas para sua concepção.

A maior parte dos livros técnicos e profissionais sobre tratamento de águas de abastecimento escritos em língua inglesa concentra-se nas tecnologias de tratamento clássicas e são complementadas com processos e operações unitárias que objetivam a remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos não removidos com eficiência pelo tratamento convencional de águas de abastecimento. Muitas dessas tecnologias ainda não são passíveis de aplicação no Brasil, seja por seus altos custos de implantação, seja por dificuldades operacionais e de manutenção de equipamentos. Tais aspectos são especialmente relevantes quando se considera que os principais clientes são empresas municipais e estaduais de saneamento, que, por sua peculiaridade, lidam com inúmeras dificuldades em sua implantação no território nacional. Apesar de o tratamento convencional de águas de abastecimento apresentar limitações, quando as estações de tratamento são bem concebidas, projetadas e operadas, sua potencialidade com relação à produção de água tratada que atenda aos padrões de potabilidade é bastante elevada, não podendo ser descartada sua adoção em países que apresentem limitações financeiras que restrinjam a utilização de processos de tratamento não convencionais. A segunda motivação para a materialização deste livro é, portanto, a possibilidade de discutir com bastante ênfase as potencialidades e limitações da adoção de estações de tratamento de água convencionais para abastecimento público, que vise ao melhor aproveitamento possível, evitando-se a utilização de tecnologias de tratamento de alto custo e não justificáveis do ponto de vista técnico e científico.

Hoje, quando se concebe uma estação de tratamento de água, seja esta qual for, é de fundamental importância que sejam considerados o tratamento e a disposição de seus resíduos líquidos e sólidos. No Brasil, somente a partir da década de 1990 os órgãos ambientais passaram a exigir que as novas estações de tratamento de água fossem concebidas dotadas de unidades de tratamento de lodos gerados nos processos de separação sólido-líquido. Em razão da pouca experiência brasileira no assunto em questão, a maior parte da literatura técnica em língua portuguesa não considera o assunto de maneira completa, sendo que este é, muitas vezes, focado em publicações diferentes. É imperioso reconhecer que não é possível mais dissociar o projeto de unidade de tratamento da fase líquida das unidades de tratamento da fase sólida, uma vez que as duas fases se encontram intimamente ligadas. Por conseguinte, a terceira motivação que justifica este livro foi a necessidade de contextualizar a concepção, o projeto e a operação de sistemas de tratamento da fase sólida e suas inter-relações com o projeto das unidades que compõem a fase líquida.

Por fim, a quarta e maior motivação deste livro foi a preparação de um material que compartilhasse minha vivência em inúmeros projetos e operação de estações de tratamento de águas de abastecimento e que, por inúmeros motivos, não são abordados na maioria dos livros técnicos que versam sobre o assunto. Uma vez que a maior parte de minha vida profissional esteve diretamente ligada à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp), muito de meu aprendizado teve lugar nas dependências de suas inúmeras estações de tratamento de água. A experiência prática, associada a uma sólida formação acadêmica obtida na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, possibilitou que muitos problemas de qualidade de água e de tratamento de águas de abastecimento pudessem ser solucionados sem a adoção ou a implantação de tecnologias de tratamento sofisticadas e de alto custo. Essa experiência está descrita neste livro por meio de vários estudos de casos discutidos e dos vídeos disponíveis, de maneira que o leitor possa julgar se as soluções propostas possam ser adotadas em seus sistemas de produção de água devidamente adaptadas para sua realidade operacional.

Em resumo, após a leitura deste livro, será possível:

- Efetuar uma combinação entre aspectos teóricos e práticos que possibilite a concepção, o projeto e a operação de estações convencionais de tratamento de águas de abastecimento.
- Explorar as potencialidades do que se conhece como tratamento convencional de águas de abastecimento, avaliando as modificações que podem ser efetuadas do ponto de vista operacional e que possibilitem a maximização de sua eficiência.
- Considerar a concepção e o projeto das unidades que compõem o tratamento da fase sólida de parte da estação de tratamento de água como um todo, procurando analisar sua interferência da operação dos processos e das operações unitárias da fase líquida.
- Ter acesso à compilação de mais de vinte anos de experiência do autor em projeto e operação de estações convencionais de tratamento de águas de abastecimento e procurar repassá-la ao leitor de maneira que este conhecimento não seja perdido e dissipado no tempo e sim replicado de modo consistente e adaptado para as mais diferentes condições, se assim for o caso.

Por se tratar de um livro mais voltado ao projeto e à operação de estações de tratamento de água, optou-se pela abdicação de discussões teóricas extensas sobre os tópicos considerados. Quando necessário, será fornecida uma breve explicação teórica de algum ponto importante, se for realmente preciso justificar a adoção de um parâmetro de projeto ou de algum procedimento operacional que viabilize a otimização do processo ou da operação unitária.

O livro totaliza treze capítulos, que distribuem o tema da maneira a seguir.

Os Capítulos 1 a 7 enfocam os processos unitários envolvidos no tratamento da fase líquida, discutindo as etapas necessárias para a clarificação e desinfecção de águas para abastecimento público.

O Capítulo 8 apresenta uma discussão acerca dos diferentes agentes oxidantes que podem ser utilizados no tratamento de águas de abastecimento e suas potencialidades e aplicabilidades.

Os Capítulos 9 e 10 expõem algumas técnicas empregadas na remoção de compostos orgânicos no tratamento de águas de abastecimento, mais especificamente compostos orgânicos precursores de subprodutos da desinfecção e compostos causadores de gosto e odor.

Finalmente, os Capítulos 11 a 13 são dedicados à concepção e ao tratamento dos resíduos gerados em estações convencionais, mais especificamente a água de lavagem de filtros e o lodo gerado nos processos de separação sólido-líquido.

Este livro pode ser empregado em cursos de graduação e pós-graduação, lembrando que seu foco são os aspectos de projeto e operação. Cada capítulo contém alguns exemplos de cálculo e dimensionamento, ilustrando a aplicação dos conceitos fundamentais de projeto discutidos no texto. Para complementação teórica de algum ponto, sugere-se ao leitor a consulta a artigos científicos específicos citados nas referências ao fim dos capítulos.

Além de seu emprego em cursos de engenharias civil e ambiental, este livro também pode ser utilizado por profissionais do setor, uma vez que são extensivamente discutidas questões de projeto e operação de estações de tratamento de água, além da apresentação de inúmeros estudos de caso e vídeos ilustrativos.

Para finalizar, vale ressaltar que os estudos de caso apresentados consistem em experiências profissionais vivenciadas pelo autor, mas, muitas vezes, a solução proposta não necessariamente foi a melhor para o problema em questão. Nesse contexto, é recomendável que o leitor, sempre que possível, efetue o delineamento de seus problemas e de suas condicionantes específicas e avalie se a solução proposta pode ser adaptada a sua realidade.

Assim, se, de algum modo, este livro puder ser útil, posso afirmar que a missão foi cumprida e convido o leitor, então, a dividir seu conhecimento entre seus pares, possibilitando que este não se perca e possa ser útil para as futuras gerações.

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Concepção de Estações de Tratamento de Água para Abastecimento Público: Evolução Histórica, Situação Atual e Perspectivas Futuras	1
Capítulo 2 – Coagulação	17
Capítulo 3 – Floculação	65
Capítulo 4 – Sedimentação Gravitacional	115
Capítulo 5 – Flotação por Ar Dissolvido	167
Capítulo 6 – Filtração	199
Capítulo 7 – Desinfecção	267
Capítulo 8 – Oxidação Química	301
Capítulo 9 – Remoção de Compostos Orgânicos e Controle da Formação de Subprodutos da Desinfecção	325
Capítulo 10 – Controle e Remoção de Compostos Causadores de Gosto e de Odor em Águas de Abastecimento	357
Capítulo 11 – Concepção de Sistemas de Tratamento da Fase Sólida em Estações de Tratamento de Água	381
Capítulo 12 – Equalização, Tratamento e Recuperação de Água de Lavagem de Filtros	407
Capítulo 13 – Adensamento, Desidratação e Disposição Final de Resíduos	429



Concepção de Estações de Tratamento de Água para Abastecimento Público: Evolução Histórica, Situação Atual e Perspectivas Futuras

É provável que o leitor tenha conhecimento das principais operações e dos processos unitários que compõem uma estação de tratamento de água convencional para abastecimento público. No entanto, é interessante que se possa discutir como que, historicamente, foi possível estabelecer sua concepção e sua definição atual.

O processo de tratamento de água pode ser visto como um conjunto de manipulações da água em suas mais diferentes apresentações, de modo que esta possa ser considerada apta para o abastecimento público. Isso significa afirmar que a qualidade físico-química e microbiológica da água atende a determinados padrões de qualidade definidos por agências reguladoras.

A concepção de estações de tratamento de água que se conhece atualmente é fruto de um enorme conjunto de desenvolvimentos empíricos e científicos que ocorreram ao longo do tempo e que deverão fazer parte de nosso futuro.

Para que se possa melhor apresentar tal concepção, é interessante discorrer um pouco sobre a cronologia dos eventos que possibilitaram seu desenvolvimento (CRITTENDEN et al., 2012).

- 4000 a.C. – Relatos em sânscrito e em grego recomendavam que as “águas impuras” deveriam ser submetidas à fervura, expostas ao sol ou filtradas em leitos de areia antes de seu consumo.
- 1500 a.C. – São apresentados em algumas gravuras egípcias artefatos confeccionados artesanalmente com a finalidade de possibilitar a separação de sólidos presentes em águas empregadas para consumo (Fig. 1-1).



Figura 1-1 Artefato egípcio confeccionado para separação de sólidos.

Observe que, há muito tempo, os povos antigos tinham a plena convicção de que, para garantir a melhora da qualidade estética da água empregada para consumo e demais finalidades, era necessária sua filtração ou o uso de qualquer outro mecanismo que viabilizasse a separação de sólidos presentes na fase líquida. Ainda que de modo incipiente, eram valorizadas as águas de melhor “qualidade”, mesmo que não fosse possível sua quantificação direta.

- 500 a.C. – Considerado o pai da medicina, Hipócrates observou que as águas de chuva deveriam ser fervidas e filtradas antes de seu consumo. Também se relata que ele teria notado que as águas

Coagulação

CONTAMINANTES PRESENTES EM ÁGUAS NATURAIS

O processo de coagulação é a primeira operação unitária que compõe uma estação de tratamento de água (ETA) convencional, seja de ciclo completo ou uma variante desta (filtração direta e filtração em linha).

As estações de tratamento de água do tipo convencionais são um conjunto de operações unitárias em série e, para que os processos a jusante da etapa de coagulação possam ser operados de maneira adequada, é necessário que a sua operação ocorra em condições ideais.

A importância do processo de coagulação reside no fato de que um dos maiores objetivos do tratamento de águas de abastecimento é garantir a produção de água tratada com características estéticas adequadas para consumo humano, ou seja, é necessário garantir sua clarificação. Os contaminantes presentes na fase líquida podem ser classificados como apresenta a Figura 2-1.

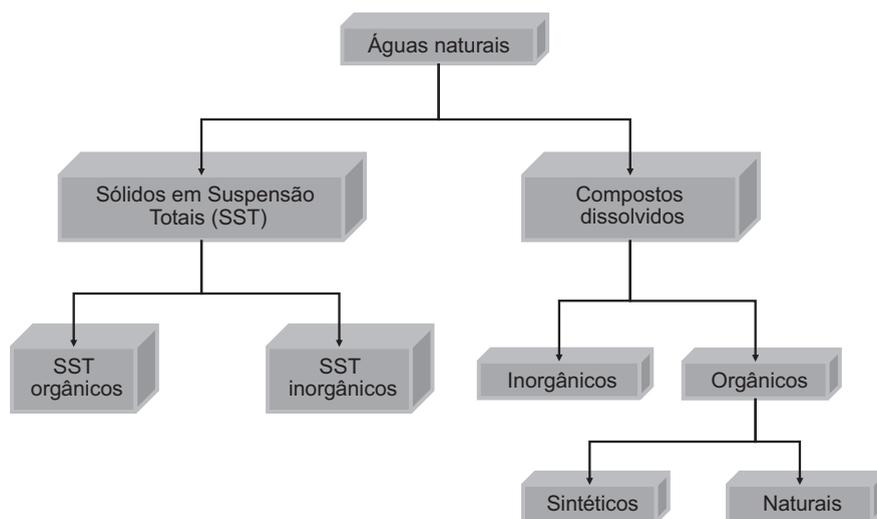


Figura 2-1 Classificação dos contaminantes presentes em águas naturais.

Os contaminantes presentes em águas naturais podem apresentar origem diversa e diferentes características físico-químicas que tenderão a impactar o processo de tratamento. A primeira distinção que se pode fazer com relação a estes diz respeito a seu tamanho físico. Partículas com dimensões superiores a $1 \mu\text{m}$ são classificadas como partículas em suspensão, e partículas com dimensões inferiores a $10^{-3} \mu\text{m}$ são definidas como partículas dissolvidas. Por sua vez, define-se que partículas que apresentem dimensão física entre os diâmetros, $10^{-3} \mu\text{m}$ e $1 \mu\text{m}$ sejam caracterizadas como partículas coloidais.

Do ponto de vista analítico, pode-se efetuar uma distinção entre partículas em suspensão e partículas dissolvidas e coloidais mediante uma análise de sólidos em suspensão totais (SST), que, essencialmente, envolve a filtração de um volume de amostra em uma membrana de filtração que apresente um diâmetro médio dos poros em torno de $1,2 \mu\text{m}$. Dessa maneira, o material retido na membrana filtrante é chamado de SST, e a parcela presente no filtrado é definida como solúvel, incorporando ambas as frações dissolvidas e coloidais.

Floculação

MECANISMOS DE AGREGAÇÃO DE PARTÍCULAS COLOIDAIS

A etapa de floculação é uma das mais importantes no processo de tratamento de água. Embora os conhecimentos qualitativos acerca deste remontem à década de 1930, do ponto de vista quantitativo, os progressos alcançados têm sido conquistados apenas recentemente. Os parâmetros de projeto e as considerações operacionais relevantes estabelecidos atualmente para as unidades de floculação empregadas no tratamento de águas de abastecimento ainda são, em sua essência, empíricos e obtidos com base no resultado de inúmeras instalações projetadas, em que se contabilizam seus sucessos e fracassos.

A essência do propósito do processo de floculação é possibilitar a agregação das partículas coloidais, de modo que estas possam ser removidas da fase líquida por processos de separação sólido-líquido, tais como a sedimentação gravitacional, a flotação com ar dissolvido ou a filtração, no caso de instalações concebidas como filtração direta.

DEFINIÇÃO DE FLOCULAÇÃO

Processo físico no qual as partículas coloidais são postas em contato umas com as outras, de modo a viabilizar o aumento de seu tamanho físico, alterando, assim, sua distribuição granulométrica.

Para que a separação das partículas coloidais por processos de separação sólido-líquido ocorra de maneira satisfatória, é necessário garantir que a dimensão física dos flocos alcance um valor adequado. Desse modo, ao se garantir a agregação das partículas presentes na água coagulada e seu posterior aumento de dimensão física, como consequência, tem-se a diminuição de sua concentração na fase líquida, como apresentado na Figura 3-1.

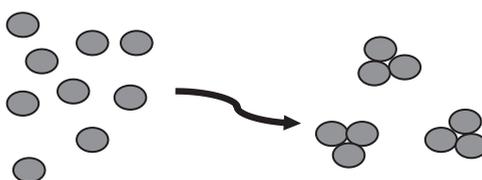


Figura 3-1 Apresentação do processo de floculação: agregação das partículas coloidais.

É importante frisar que, para o processo de floculação transcorrer de maneira satisfatória, é necessário garantir a desestabilização das partículas coloidais mediante uma correta operação do processo de coagulação. Do ponto de vista físico, o processo de coagulação é responsável pela desestabilização das partículas coloidais, não devendo ser encarado como uma operação unitária responsável pela agregação das partículas coloidais. Portanto, teoricamente, a distribuição granulométrica das partículas coloidais presentes na água bruta e na coagulada é essencialmente igual.

Quando a água coagulada é submetida ao processo de floculação, tem-se uma alteração na distribuição granulométrica das partículas coloidais, ocorrendo o aumento de seu diâmetro médio e a diminuição de sua concentração (Fig. 3-2).

Com o seu aumento físico, pode-se, portanto, garantir sua maior remoção nas unidades de separação sólido-líquido, o que garante uma maior eficiência do processo de tratamento como um todo.

Sedimentação Gravitacional

SEPARAÇÃO DE PARTÍCULAS COLOIDAIS POR SEDIMENTAÇÃO GRAVITACIONAL

Uma vez submetidas as partículas coloidais aos processos de coagulação e floculação, faz-se necessário garantir sua remoção da fase líquida. Como comentado nos capítulos anteriores, os processos de coagulação e floculação possibilitarão que, mediante a agregação das partículas coloidais, estas consigam adquirir um diâmetro físico tal que a confirmem uma velocidade de sedimentação elevada o suficiente para serem removidas por sedimentação gravitacional.

DEFINIÇÃO DE SEDIMENTAÇÃO GRAVITACIONAL

Processo físico no qual as partículas coloidais são removidas da fase líquida por meio de processos de sedimentação gravitacional.

Desse modo, uma vez alterada a distribuição granulométrica das partículas coloidais presentes na fase líquida como resultado de uma operação adequada dos processos de coagulação e floculação, haverá uma partícula crítica, que apresentará uma velocidade de sedimentação crítica e tenderá a ser removida nas unidades de sedimentação situadas a jusante (Fig. 4-1).

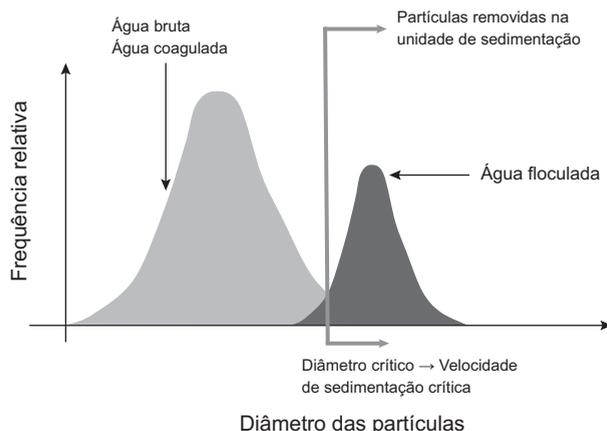


Figura 4-1 Distribuição granulométrica esperada para as partículas coloidais presentes na fase líquida e sua remoção em unidades de sedimentação.

Os processos de sedimentação gravitacional podem ser divididos em quatro tipos principais, a saber:

- Sedimentação discreta (Tipo I).
- Sedimentação floculenta (Tipo II).
- Sedimentação em zona (Tipo III).
- Sedimentação por compressão (Tipo IV).

Os processos de sedimentação a serem abordados neste capítulo serão basicamente o Tipo I e o Tipo II, por serem os mais comuns em decantadores convencionais e em decantadores de alta taxa no tratamento convencional de águas de abastecimento.

A sedimentação do Tipo I classicamente ocorre em caixas de areia e unidades de pré-sedimentação, e sua característica principal é o fato de que a dimensão física das partículas a serem removidas não se altera com o tempo, e, assim sendo, sua velocidade de sedimentação também permanece constante.

Flotação por Ar Dissolvido

SEPARAÇÃO DE PARTÍCULAS COLOIDAIS POR FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

O processo de flotação por ar dissolvido é uma opção bastante atrativa como processo de separação sólido-líquido, sendo que sua utilização no tratamento de águas de abastecimento data do início dos anos 1960. Com o desenvolvimento de modelos conceituais teóricos acerca do funcionamento de suas principais partes constitutivas (saturadores de ar, zona de reação e clarificação) e respaldado por resultados experimentais bastante promissores, o número de instalações cresceu de maneira vertiginosa (EDZWALD; HAARHOFF, 2012).

O princípio do processo de flotação por ar dissolvido envolve a redução da massa específica do floco, de modo que seu valor seja menor que a massa específica da água. Desta maneira, o floco tenderá a ascender verticalmente e separar-se da fase líquida. A redução da massa específica do floco é garantida pela adesão de partículas de ar liberadas na fase líquida sob condições controladas.

DEFINIÇÃO DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

Processo físico no qual as partículas coloidais são removidas da fase líquida por meio da redução de sua massa específica mediante a incorporação de partículas de ar.

Como verificado no Capítulo 4, a velocidade de sedimentação de partículas coloidais na fase líquida pode ser calculada pela lei de Newton, que pode ser expressa assim:

$$v_s = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot (\rho_f - \rho) \cdot d_f}{3 \cdot C_d \cdot \rho}} \quad \text{(Equação 5-1)}$$

v_s = velocidade de sedimentação da partícula em relação ao fluido (LT^{-1})

g = aceleração da gravidade (LT^{-2})

ρ_f = massa específica do floco (ML^{-3})

ρ = massa específica da água (ML^{-3})

d_f = diâmetro do floco (L)

C_d = coeficiente de arraste

As partículas formadas durante o processo de coagulação e floculação apresentam valores de massa específica em torno de 1.020 a 1.200 kg/m^3 . Por conseguinte, quando imersas na fase líquida, tenderão a ter uma velocidade descendente denominada velocidade crítica de sedimentação (v_s). Como apresentado na Figura 5-1 (Condição 1), a tendência será a sedimentação do floco, uma vez que massa específica deste é maior que a da água.

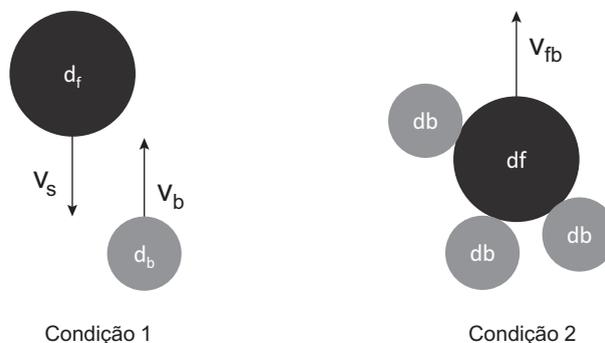


Figura 5-1 Agregação de n bolhas de ar de diâmetro d_b em um floco de diâmetro d_f .

Filtração

SEPARAÇÃO DE PARTÍCULAS COLOIDAIS POR FILTRAÇÃO

O processo de filtração é o último processo unitário cuja função é garantir a remoção de partículas coloidais presentes na fase líquida, daí reside sua grande importância no processo de tratamento de águas de abastecimento. Justifica-se a necessidade do processo de filtração como parte constitutiva em estações de tratamento de água uma vez que, por melhor que seja a operação das unidades de sedimentação gravitacional ou flotação por ar dissolvido, estas não são capazes de garantir a remoção de 100% das partículas coloidais presentes na fase líquida. Dessa maneira, todas as partículas que não forem removidas nas etapas de sedimentação ou flotação deverão ser removidas no processo de filtração.

Se, porventura, as unidades de filtração não estiverem funcionando de modo satisfatório, haverá uma tendência de deterioração na qualidade da água filtrada, o que pode não apenas comprometer suas características estéticas, mas também impor riscos à operação da etapa de desinfecção.

DEFINIÇÃO DE FILTRAÇÃO

Processo físico-químico no qual as partículas coloidais são removidas da fase líquida mediante sua percolação por um meio granular, garantindo-se a produção de água filtrada com características estéticas adequadas aos fins de potabilidade.

Embora, do ponto de vista tecnológico, a filtração possa ocorrer de diferentes modos, tradicionalmente, a filtração empregada no tratamento convencional de águas de abastecimento envolve a percolação de água em um meio granular, tendo esta altura e granulometria específicas (Fig. 6-1).

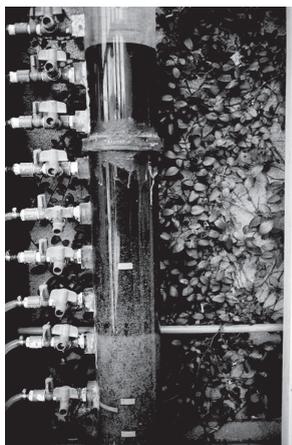
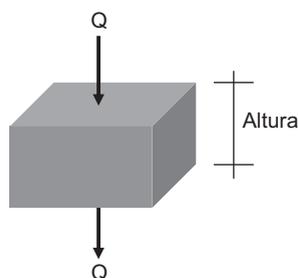
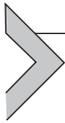


Figura 6-1 Sistemas de filtração empregados no tratamento de águas de abastecimento – percolação em meio granular.

Embora a filtração de água para fins de abastecimento público tenha se expandido de modo significativo a partir do início do século XX, apenas nos meados de 1950 em diante é que se passou a compreender com mais profundidade os principais mecanismos envolvidos no processo de retenção de partículas no meio filtrante (IVES, 1970).



Desinfecção



CONCEITUAÇÃO DO PROCESSO DE DESINFECÇÃO

O tratamento de águas de abastecimento tem como objetivo principal a produção de uma água adequada do ponto de vista estético e segura do ponto de vista microbiológico. Dessa maneira, é necessário que sejam previstas alternativas tecnológicas que possibilitem garantir a remoção física e inativação dos microrganismos patogênicos que eventualmente estejam presentes na fase líquida.

Os processos de coagulação, floculação, sedimentação e filtração são essencialmente responsáveis pela remoção de partículas coloidais presentes na fase líquida e, entre estas, incorporam-se microrganismos patogênicos, que também são partículas de origem orgânica. No entanto, como não é possível garantir a segurança microbiológica da água tratada somente por sua remoção física, é necessário que haja um processo adicional que possibilite a inativação de microrganismos patogênicos presentes na fase líquida.

DEFINIÇÃO DE DESINFECÇÃO

Processo físico químico que objetiva eliminar, de modo econômico, os microrganismos patogênicos presentes na fase líquida.

É conveniente diferenciar os processos de desinfecção e esterilização. Este último tem por propósito eliminar todas as formas de vida na fase líquida, ao passo que a desinfecção tem por finalidade a remoção dos microrganismos patogênicos. É importante ter em mente, portanto, que a água tratada, mesmo submetida a processos de desinfecção, ainda detém formas de vida microbiológicas que tendem a se desenvolver no sistema de distribuição.

O conceito de desinfecção, portanto, pode ser encarado de maneira mais abrangente que somente restrito à inativação dos microrganismos patogênicos presentes na fase líquida (Fig. 7-1).

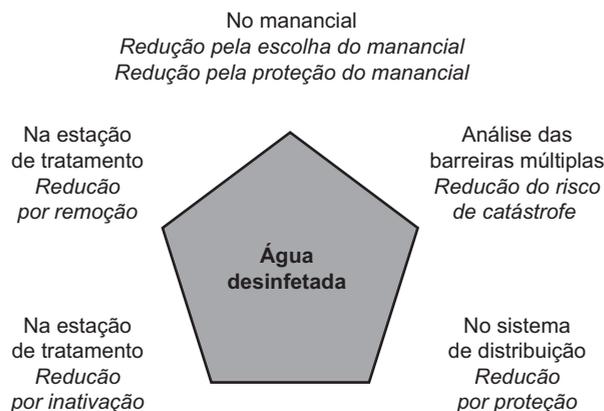


Figura 7-1 Visão integrada do processo de desinfecção no tratamento de águas de abastecimento.

Como apresentado na Figura 7-1, o conceito de desinfecção pode ser entendido como um conjunto de ações que objetivem garantir a segurança microbiológica da água tratada. Em geral, entende-se o processo de desinfecção como somente a inativação dos microrganismos patogênicos por meio da adição de agentes químicos. No entanto, a segurança microbiológica da água é composta por uma somatória de ações, a saber:

Oxidação Química

UTILIZAÇÃO DA OXIDAÇÃO QUÍMICA NO TRATAMENTO DE ÁGUAS DE ABASTECIMENTO

A oxidação química tem sido largamente empregada no tratamento de águas de abastecimento como solução para uma grande gama de problemas, por exemplo, a remoção de compostos inorgânicos (ferro [Fe] e manganês [Mn]), a minimização de problemas de gosto e odor, a remoção de cor, entre outros. Como o cloro é tradicionalmente empregado no tratamento de águas de abastecimento como agente desinfetante, a maioria das estações de tratamento de água o usa também como agente oxidante. No entanto, dadas as restrições técnicas associadas à formação de compostos orgânicos clorados (subprodutos da desinfecção), a utilização do cloro como agente oxidante tem sofrido restrições e possibilitado o emprego de agentes oxidantes alternativos (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1999).

DEFINIÇÃO DE OXIDAÇÃO QUÍMICA

Processo físico químico que envolve a adição de agentes oxidantes no processo de tratamento objetivando a solução de múltiplos problemas de qualidade da água.

Tradicionalmente, a utilização da oxidação química no tratamento de águas de abastecimento pode ser efetuada na pré, inter e pós-oxidação (Fig. 8-1).

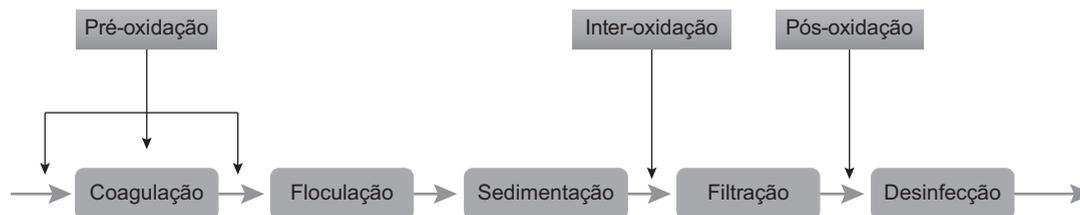


Figura 8-1 Pontos de aplicação de agentes oxidantes em estações de tratamento de água do tipo convencional.

A pré-oxidação envolve a aplicação do agente oxidante na água bruta, podendo ser efetuada antes da coagulação, próximo desta ou imediatamente após. A interoxidação possibilita a dosagem do agente oxidante na água decantada, e, desse modo, sua aplicação é efetuada em algum ponto entre os decantadores e o sistema de filtração. Por sua vez, a pós-oxidação tem por objetivo principal possibilitar a operação da etapa de desinfecção, sendo o agente oxidante aplicado após a filtração e a montante do tanque de contato.

A aplicação do agente oxidante na pré, inter e pós-oxidação deve atender à solução de problemas de qualidade e tratamento específicos, sendo normalmente empregados com os objetivos apresentados a seguir (CRITTENDEN et al., 2012).

Oxidação de compostos inorgânicos, normalmente ferro e manganês em estado de oxidação reduzido

Determinados tipos de águas brutas provenientes de mananciais superficiais podem apresentar concentrações de ferro e manganês sob a apresentação de Fe^{+2} e Mn^{+2} , e sua remoção da fase líquida requer sua oxidação para Fe^{+3} e Mn^{+4} , de modo a possibilitar sua precipitação na forma de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e MnO_2 . Normalmente, a oxidação de compostos inorgânicos presentes na água bruta exige que a aplicação do agente oxidante seja realizada na pré-oxidação, uma vez que as espécies oxidadas e insolúveis podem ser removidas nas etapas de sedimentação e filtração.

Remoção de Compostos Orgânicos e Controle da Formação de Subprodutos da Desinfecção

COMPOSTOS ORGÂNICOS E SUA PRESENÇA EM ÁGUAS DE ABASTECIMENTO

Até o início da década de 1970, as maiores preocupações com respeito à presença de compostos orgânicos em águas de abastecimento deviam-se a sua capacidade de conferir cor à água tratada. Com o desenvolvimento progressivo de diferentes técnicas analíticas, por exemplo, a cromatografia líquida (HPLC) e a cromatografia gasosa associada à espectrometria de massa (GC-MS), tornou-se possível identificar inúmeros compostos orgânicos que podem estar presentes em águas naturais e tratadas, e que, potencialmente, podem trazer riscos à saúde humana.

O tratamento convencional de águas de abastecimento tem por objetivo assegurar a remoção de partículas em suspensão e coloidais, ou seja, possibilitar a clarificação adequada da água tratada, bem como garantir sua segurança microbiológica, não tendo sido originalmente concebido para a remoção de compostos orgânicos presentes na fase líquida (Fig. 9-1). Desse modo, sua ação na remoção de compostos orgânicos em fase aquosa é limitada, devendo, portanto, ser complementada, seja com processos unitários adicionais, seja mediante a modificação de condições operacionais do processo de tratamento.

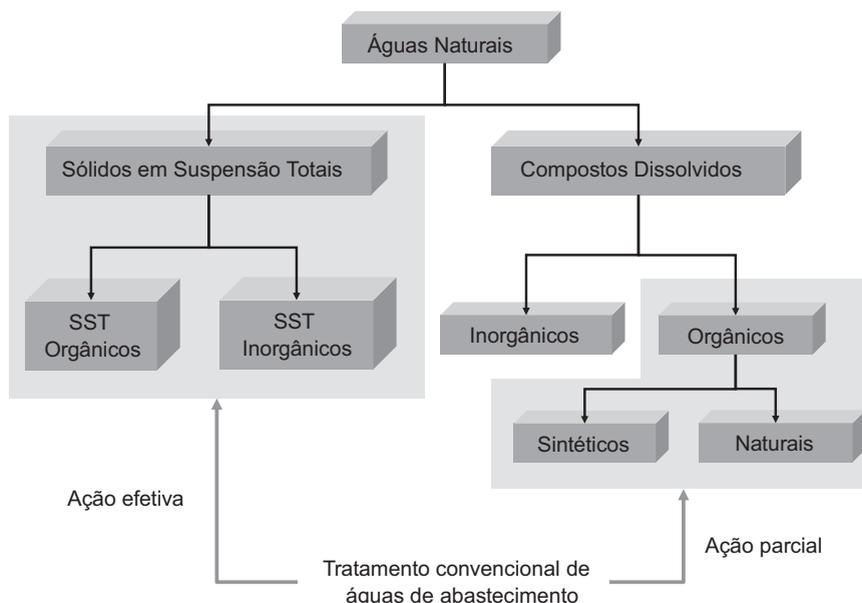


Figura 9-1 Espectro de contaminantes presentes em águas naturais e ação do tratamento convencional de águas de abastecimento.

Embora o tratamento convencional de águas de abastecimento não tenha por objetivo, portanto, garantir a remoção de compostos orgânicos presentes na fase líquida, pode possibilitar, ainda que parcialmente, sua remoção da fase líquida e o consequente atendimento aos padrões de potabilidade vigentes.

Os compostos orgânicos que, porventura, possam estar presentes na água bruta e tratada podem ser oriundos de processos biogênicos e antropogênicos, e suas concentrações em meio aquoso podem variar de ng/L a mg/L. De acordo com sua origem, podem ser classificados como relacionados a seguir (CRITTENDEN et al., 2012).

Controle e Remoção de Compostos Causadores de Gosto e de Odor em Águas de Abastecimento

 **ORIGEM DOS PROBLEMAS DE GOSTO E DE ODOR EM ÁGUAS DE ABASTECIMENTO**

Problemas de gosto e de odor em águas de abastecimento não são uma questão ambiental relativamente recente. Há relatos de inúmeras ações desenvolvidas por empresas de saneamento para sua minimização desde o início do século XX (MALLEVIALE; SUFFET, 1987).

As estações de tratamento de água foram inicialmente concebidas como parte constitutiva de sistemas públicos de abastecimento de água, tendo por objetivo o fornecimento de água esteticamente adequada ao consumo humano. Até o início do século XX, sua operação unitária exclusiva era a etapa de filtração, que tinha por objetivo a remoção de partículas coloidais que pudessem acarretar prejuízos a sua aceitabilidade pela população.

No entanto, com a consolidação da Revolução Industrial e o surgimento dos grandes conglomerados urbanos, bem como com o advento da Primeira Grande Guerra Mundial, novos quesitos de qualidade passaram a ser impostos para águas de abastecimento, ressaltando-se o controle das concentrações de compostos químicos orgânicos e inorgânicos que pudessem causar danos à saúde humana.

Com isso, várias modificações operacionais e operações unitárias passaram a ser incorporadas no tratamento de água, ressaltando-se os processos de oxidação química e adsorção em carvão ativado. Embora essas tecnologias de tratamento tenham sido adotadas em função do estabelecimento de padrões de potabilidade cada vez mais restritivos, novos critérios foram impostos quanto aos padrões estéticos mínimos exigidos para uma água de abastecimento, entre estes, a ausência de gosto e de odor.

Como consequência do desenvolvimento das grandes cidades e de sua deficiência nos serviços de coleta, afastamento, tratamento de esgotos sanitários e no controle da poluição industrial, os problemas de gosto e de odor em águas de abastecimento passaram a se tornar muito complexos, de solução tecnológica difícil e extremamente onerosa.

De modo geral, a presença de odor e de sabor em águas de abastecimento pode ser ocasionada pelos seguintes motivos (MALLEVIALE; SUFFET, 1987):

- Presença de constituintes inorgânicos em concentrações elevadas, como o ferro, cloreto, sulfato, gás sulfídrico, entre outros.
- Presença de compostos orgânicos de origem antropogênica (fenóis, nitrofenóis) e demais compostos aromáticos (tetracloro de carbono, tetracloroetileno etc.).
- Odor e sabor em águas de abastecimento originados do processo de tratamento. Em geral, problemas dessa natureza estão associados à ação do agente de oxidante e/ou desinfetante e suas reações com compostos orgânicos, que podem ser de origem biogênica e ou antropogênica.
- Odor e sabor em águas de abastecimento com origem no sistema público de distribuição de água. Dependendo das condições físicas das redes de distribuição de água, de sua concepção e seu traçado, bem como das características da água bruta e tratada, é comum que estas apresentem concentrações elevadas de ferro e manganês, que podem causar gosto metálico à água distribuída. O crescimento microbiológico nas redes de distribuição também tem sido causa de inúmeros problemas de odor e sabor, bem como a presença de altas concentrações do próprio agente desinfetante.
- Presença de compostos orgânicos de origens biogênicas. É sabido que inúmeros microrganismos, notadamente certas algas, especialmente as cianobactérias, assim como determinados fungos, são responsáveis pela produção de compostos orgânicos resultantes de seu metabolismo, que, sob certas condições ainda não totalmente conhecidas, são liberados para a fase líquida. Esses compostos orgânicos são responsáveis por inúmeros problemas de odor e sabor em águas de abastecimento, sendo, indubitavelmente, os mais difíceis de serem removidos.

Concepção de Sistemas de Tratamento da Fase Sólida em Estações de Tratamento de Água

 **ORIGEM DOS RESÍDUOS GERADOS NO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÁGUAS DE ABASTECIMENTO**

O tratamento e a disposição dos resíduos sólidos gerados pelos processos de tratamento de águas de abastecimento têm recebido atenção no Brasil apenas nos últimos anos. Enquanto nos Estados Unidos e em certos países da Europa o problema de tratamento e disposição dos resíduos sólidos gerados em estações de tratamento de água (ETAs) tem sido estudado extensivamente desde a década de 1970, no Brasil, apenas recentemente os órgãos de controle ambiental têm dado importância a seu tratamento e disposição final.

Uma das grandes dificuldades na escolha de alternativas de engenharia que contemplem o tratamento de resíduos gerados em ETAs é a escassez de dados e de bibliografia nacional a respeito, basicamente porque, no Brasil, poucas ETAs têm apresentado soluções que objetivem a minimização da quantidade de resíduos sólidos gerados, seu tratamento e sua disposição final. A maior parte das ETAs no Brasil ainda efetua a disposição de seus resíduos no sistema de drenagem de águas pluviais, os quais, posteriormente, são direcionados para o corpo receptor, acarretando assoreamento dos corpos d'água e problemas estéticos e visuais relevantes.

Na atualidade, o projeto e a construção de novas ETAs exigem a implantação do tratamento de sua fase sólida, o que, de certo modo, facilita sua concepção. Entretanto, no Brasil, existem inúmeras ETAs construídas antes da década de 1990, sem sistemas de tratamento da fase sólida e cuja implantação é enormemente dificultada.

Assim sendo, os desafios atualmente impostos para a solução do problema relativo ao tratamento dos resíduos gerados em ETAs são significativos, não apenas pela necessidade de implantação de obras, aquisição de equipamentos e operação do sistema, mas também por seus custos operacionais elevados, bem como pelas dificuldades impostas na disposição final do lodo.

Infelizmente, deve-se ressaltar que a implantação de sistemas de tratamento de fase sólida em ETAs, ainda que possibilite a solução de um problema ambiental relevante, induz a aumento dos custos operacionais do processo de tratamento e que devem estar devidamente inseridos na remuneração do operador do sistema de abastecimento de água, seja ele público, seja ele privado.

De modo geral, os resíduos gerados em ETAs podem ser divididos nas quatro grandes categorias a seguir (ASCE; AWWA; EPA, 1996).

- Resíduos gerados durante processos de tratamento de água visando à remoção de cor e turbidez. Em geral, os resíduos sólidos produzidos englobam os lodos gerados nos decantadores (ou eventualmente de flotores com ar dissolvido) e a água de lavagem dos filtros.
- Resíduos sólidos gerados durante processos de abrandamento.
- Resíduos gerados em processos de tratamento não convencionais visando à redução de compostos orgânicos presentes na água bruta, tais como carvão ativado granular saturado, ar proveniente de processos de arraste com ar etc.
- Resíduos líquidos gerados durante processos visando à redução de compostos inorgânicos presentes na água bruta, tais como processos de membrana (osmose reversa, ultrafiltração, nanofiltração etc.).

No Brasil, a maior parte das ETAs em operação foi concebida como do tipo convencional de ciclo completo ou variante (filtração direta, filtração em linha etc.), não havendo um número significativo de ETAs dotadas de processos de adsorção em carvão ativado granular, arraste com ar ou processos de membrana. Dessa maneira, os resíduos gerados por esses processos de tratamento não serão considerados, enfocando-se, tão somente, os resíduos gerados por estações de tratamento de água do tipo convencionais e suas variantes.

Equalização, Tratamento e Recuperação de Água de Lavagem de Filtros

CONCEPÇÃO DE SISTEMAS DE EQUALIZAÇÃO, TRATAMENTO E RECUPERAÇÃO DE ÁGUA DE LAVAGEM DE FILTROS

Os principais resíduos produzidos em estações de tratamento de água do tipo convencionais de ciclo completo são o lodo gerado nas unidades de separação sólido-líquido (decantadores convencionais ou de lata taxa e flutuadores por ar dissolvido) e a água de lavagem dos filtros. Como comentado no Capítulo 11, em razão de ambos os resíduos apresentarem características distintas, a concepção dos sistemas de tratamento da fase sólida de ETAs (ETAs) convencionais de ciclo completo envolve sua segregação e posterior tratamento. Em geral, o lodo descarregado pelas unidades de sedimentação ou por flotação por ar dissolvido apresenta baixa vazão e alta concentração de sólidos, ao passo que a água de lavagem dos filtros tem elevada vazão e baixa concentração de sólidos.

Em razão de sua baixa concentração de sólidos em suspensão totais e considerando que seu consumo se situa entre 2% e 5% do volume de água bruta aduzido por dia, justifica-se, sempre que possível, o reaproveitamento da água de lavagem dos filtros pelo processo de tratamento (KAWAMURA, 2000; QASIM; MOTLEY; ZHU, 2000). Inclusive, este tem sido um dos maiores motivos de a implantação de sistemas de tratamento da água de lavagem dos filtros ter recebido grande atenção nos últimos tempos.

Quando se analisa a concepção de sistemas de recuperação de água de lavagem em estações de tratamento de água do tipo convencional de ciclo completo, podem ser consideradas duas opções, a saber:

- Recuperação da água de lavagem dos filtros e sua recirculação integral sem a separação de sólidos

A recuperação da água de lavagem dos filtros e sua recirculação integral sem a separação dos sólidos envolve a construção de um sistema de equalização e estação elevatória, cuja função deverá ser possibilitar o recalque da água de lavagem devidamente equalizada para o início do processo de tratamento. A Figura 12-1 apresenta um fluxograma indicando as principais partes constitutivas dessa alternativa.

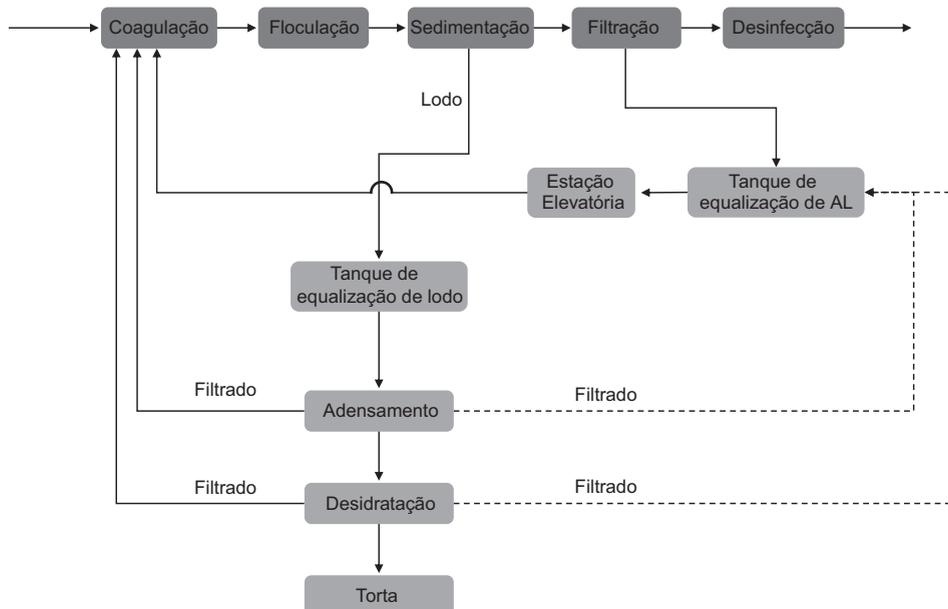
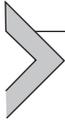
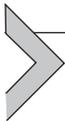


Figura 12-1 Concepção de sistemas de recuperação de água de lavagem dos filtros sem sua clarificação.



Adensamento, Desidratação e Disposição Final de Resíduos



ADENSAMENTO DE LODOS PRODUZIDOS EM UNIDADES DE SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO

Os resíduos produzidos nas unidades de separação sólido-líquido (decantadores convencionais de fluxo horizontal e de alta taxa) geralmente empregadas em estações de tratamento de água do tipo convencionais de ciclo completo apresentam baixos teores de sólidos, em geral inferiores a 1,0%. Desse modo, requer-se que se passe por etapas de adensamento e desidratação, cuja função principal deverá ser elevar seus teores de sólidos para valores que permitam seu manuseio de modo adequado, visando sua destinação final.

As alternativas mais comuns para o adensamento de lodos gerados em processos de tratamento de água são: a utilização de adensadores por gravidade, adensadores mecanizados ou flotação por ar dissolvido (CORNWELL; Roth, 2011; CRITTENDEN et al., 2012).

Os adensadores por gravidade são empregados há bastante tempo, e, por conseguinte, sua utilização já é consagrada, existindo parâmetros de projeto que possibilitam um dimensionamento adequado das unidades. Por sua vez, o uso de adensadores do tipo mecanizados é mais recente, sendo que o sucesso de sua aplicação no tratamento de lodos gerados em estações de tratamento de água depende fundamentalmente da escolha de equipamentos de fabricantes idôneos e de boa reputação no mercado. A opção pela flotação por ar dissolvido para adensamento de lodos gerados em estações de tratamento de água não é muito frequente, em razão de sua alta complexidade operacional, sendo seu emprego mais comum no adensamento de lodo biológico em estações de tratamento de esgotos sanitários de médio a grande porte.

Os adensadores por gravidade são geralmente de geometria circular e dotados de sistemas de remoção mecânica de lodos com operação relativamente simples (Fig. 13-1).

Quando operados de modo adequado, esse tipo de adensador pode alcançar valores de teor de sólidos no lodo adensado em torno de 2% a 3%, sendo mais comum algo mais próximo a 2%. As taxas de captura de sólidos em adensadores por gravidade tendem a variar entre 85% w 95%, o que permite que o líquido clarificado possa retornar para o início do processo de tratamento. A Figura 13-2 apresenta uma vista do líquido clarificado produzido em um adensador por gravidade.

Para que a etapa de adensamento possa ocorrer de maneira satisfatória, é necessário o condicionamento do lodo com polímero, sendo que as dosagens mais usuais se situam em torno de 2 a 6 g/kg ST. Como há uma grande variedade de polímeros disponíveis no mercado, a definição do produto mais indicado e de sua respectiva dosagem é função das características do lodo a ser adensado, devendo, portanto, ser definido com base em ensaios experimentais específicos (DENTEL et al., 1988).

Ponto Relevante 1: Para que o lodo produzido em unidades de separação sólido-líquido possa ser adensado com eficiência, é necessário seu condicionamento com polímero, devendo sua escolha e respectivas dosagens ser definidas por meio de ensaios experimentais específicos.

Como o objetivo das unidades de adensamento é a produção de lodo adensado com teores de sólidos superiores a 2%, seu parâmetro de projeto mais relevante para fins de dimensionamento é a carga de sólidos aplicada, sendo que seus valores dependem da natureza e características físico-químicas do lodo, bem como da eficiência de seu condicionamento químico. Embora importante no projeto de sistemas de separação sólido-líquido, a taxa de escoamento superficial não deve ser utilizado como parâmetro de projeto.

Concepção, projeto e operação de estações de tratamento de água tem por objetivo oferecer subsídios aos diferentes profissionais nas áreas de engenharia civil e ambiental na elaboração de projetos de estações de tratamento de águas de abastecimento, enfocando os aspectos técnicos e operacionais mais relevantes no dimensionamento de seus diversos processos unitários. O livro que aborda o projeto das unidades de processo da fase líquida, recuperação e tratamento da água de lavagem de filtros, adensamento e desidratação de lodos, discute também a utilização de diferentes agentes oxidantes em estações de tratamento de água, remoção de subprodutos da desinfecção e controle de gosto e odor.

Cada capítulo, ricamente ilustrado e com inúmeros exemplos de cálculo e dimensionamento que irão auxiliar o leitor na compreensão dos tópicos mais importantes, contém também estudos de caso reais que permitem efetuar uma fusão entre projeto e operação, teoria e prática possibilitando uma compreensão mais abrangente para o projeto de estações de tratamento de água. A leitura deste texto é recomendada para alunos de graduação, pós-graduação e profissionais do setor

