



SISTEMAS SUSTENTÁVEIS DE ESGOTOS

2ª edição revista

SÉRGIO ROLIM MENDONÇA
LUCIANA COELHO MENDONÇA

Blucher

Sérgio Rolim Mendonça
Luciana Coêlho Mendonça

SISTEMAS SUSTENTÁVEIS DE ESGOTOS

Orientações técnicas para projeto e dimensionamento
de redes coletoras, emissários, canais, estações
elevatórias, tratamento e reúso na agricultura

2ª edição revista

Sistemas sustentáveis de esgotos: orientações técnicas para projeto e dimensionamento de redes coletoras, emissários, canais, estações elevatórias, tratamento e reúso na agricultura

© 2017 Sérgio Rolim Mendonça, Luciana Coêlho Mendonça

1ª edição – 2016

2ª edição – 2017

Foto de capa: Dirceu Tortorello

Editores Edgard Blücher Ltda.

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar
04531-934 – São Paulo – SP – Brasil
Tel 55 11 3078-5366
contato@blucher.com.br
www.blucher.com.br

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

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

Todos os direitos reservados pela Editora
Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Mendonça, Sérgio Rolim

Sistemas sustentáveis de esgotos : orientações
técnicas para projeto e dimensionamento de redes
coletoras, emissários, canais, estações elevatórias,
tratamento e reúso na agricultura / Sérgio Rolim
Mendonça, Luciana Coelho Mendonça. — 2. ed.
revista -- São Paulo : Blucher, 2017.
364 p. : il.

Bibliografia

ISBN 978-85-212-1254-6

1. Esgotos 2. Esgotos – Projetos e construção 3.
Águas residuais 4. Engenharia sanitária I. Título. II.
Mendonça, Luciana Coelho.

17-1456

CDD 628.24

Índice para catálogo sistemático:
1. Esgotos – Projetos e construção

CONTEÚDO

PREFÁCIO DOS AUTORES À 2ª EDIÇÃO	15
PREFÁCIO DA 1ª EDIÇÃO.....	17
CAPÍTULO 1 – CARACTERÍSTICAS DOS ESGOTOS SANITÁRIOS	21
Generalidades, definição e origem	21
Odor	24
Aparência	24
Conceito de poluição	24
Características qualitativas e quantitativas	25
Cargas orgânicas das estações de tratamento de esgoto	37
Concentração dos esgotos	39
População equivalente	42
Medição de concentração de contaminantes em esgotos	44
Principais fases do tratamento dos esgotos domésticos	51
Referências	61

CAPÍTULO 2 – HIDRÁULICA DOS COLETORES DE ESGOTO	65
Composição dos esgotos domésticos	65
Peso específico e viscosidade cinemática	65
Escoamento do esgoto sanitário em condutos de seção circular	65
Classificação do escoamento nos canais abertos	66
Teorema de Bernoulli	66
Forças em ação em um canal aberto	68
Equação da continuidade	70
Energia específica em canais abertos	70
Número de Froude	72
Perdas de carga localizadas nas redes de esgoto	73
Perdas de carga por atrito nos coletores de esgoto	75
Fórmulas para cálculo do coeficiente de Chézy e da fórmula universal	76
Relações geométricas e trigonométricas dos elementos da seção circular	80
Seção circular de máxima eficiência	81
Relação entre os elementos das seções circulares parcialmente cheias e das seções plenas pela fórmula de Manning em função do ângulo do setor circular	82
Fórmulas derivadas da equação de Manning	83
Métodos iterativos nos cálculos analíticos de condutos de seção circular	84
Estimativa de vazão na rede coletora	87
Condições hidráulicas das redes de esgoto de acordo com as exigências da ABNT NBR 9.649, de 1986	87
Condição de controle de remanso	92
Fórmulas práticas para estimativa da profundidade ou lâmina crítica	94
Conceitos e parâmetros importantes	94
Roteiro para traçado de uma rede de esgoto sanitário	95
Implantação de coletores	96
<i>Softwares</i> utilizados para projeto de redes de esgoto	98
Tabelas para dimensionamento de coletores	99
Referências	114

CAPÍTULO 3 – CANAIS E CONDUTOS FORÇADOS	117
Fluxo em canais abertos	117
Canais de seção trapezoidal, retangular e triangular	118
Fórmulas utilizadas	119
Dimensionamento de canais – exemplos	122
Condutos circulares forçados	125
Pressões internas máximas nas tubulações de PVC	131
Espessura do revestimento de cimento dos tubos de ferro fundido	131
Espessura nominal dos tubos de ferro fundido	131
Pressões internas máximas nos tubos de ferro fundido	132
Dimensionamento de condutos forçados – exemplos	133
Referências	135
CAPÍTULO 4 – PROGRAMAS PARA CALCULADORA CIENTÍFICA HP 35S	137
Métodos iterativos	137
Fórmulas para dimensionamento de condutos forçados de seção circular (Colebrook-White)	138
Fórmulas para dimensionamento de condutos livres de seção circular (Manning)	140
Fórmulas para dimensionamento de canais de seção trapezoidal, retangular ou triangular (Manning)	143
Referências	144
CAPÍTULO 5 – ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ESGOTO.....	147
Localização	147
Classificação das estações elevatórias	148
Tipos de bomba utilizados	148
Estações elevatórias convencionais	151
Principais aspectos de projeto de estações elevatórias e poços de sucção	151
Aspectos relacionados a tratamento preliminar, ventilação e controle de odores em EEE	174

Dimensionamento de uma estação elevatória	181
Referências	192
CAPÍTULO 6 – CARGAS SOBRE TUBOS ENTERRADOS.....	195
Introdução	195
Fórmula de Marston	196
Largura da vala	200
Cargas móveis e fixas	202
Tipos de bases para tubos enterrados em valas	206
Resistência à compressão diametral em função do tipo de material	211
Referências.....	218
CAPÍTULO 7 – LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO	221
Introdução	221
Grandes sistemas de lagoas de estabilização	225
Fatores meteorológicos, físicos, químicos e microbiológicos que interferem no mecanismo de autodependência das lagoas	226
Padrões de vazão e mistura nas lagoas	235
Modelos empregados para o projeto das lagoas de estabilização	244
Projeto e dimensionamento de lagoas anaeróbias	244
Projeto e dimensionamento de lagoas facultativas	248
Projeto e dimensionamento de lagoas de maturação	254
Referências	265
CAPÍTULO 8 – LIMPEZA E DESTINO FINAL DOS LODOS PRODUZIDOS NAS LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO	271
Introdução	271
Remoção de lodos das lagoas de estabilização	274
Equipamentos para determinação da camada de lodo nas lagoas em funcionamento	277
Principais objetivos e métodos utilizados para remoção de lodos	277

Estimativa do volume de lodo	280
Caracterização do lodo	281
Procedimento para coleta de lodo	283
Estimativa do tempo de secagem do lodo	283
Tratamento e disposição final do lodo removido	285
Referências.....	289

CAPÍTULO 9 – A IMPORTÂNCIA DO REÚSO DE EFLUENTES DE ESGOTOS DOMÉSTICOS TRATADOS NA AGRICULTURA293

Introdução	293
Principais vantagens do reúso para a irrigação	295
Tratamento do esgoto sanitário	297
Diretrizes recomendadas pela Organização Mundial da Saúde para uso de esgoto na agricultura	299
Tolerância à salinidade em culturas	302
Conceito de desenvolvimento sustentável	305
Diretrizes para melhorar a gestão das águas residuais domésticas e tornar mais sustentável a proteção da saúde	305
Esquema administrativo para a organização de núcleos agrícolas	312
Referências	314

CAPÍTULO 10 – CONSULTORIA EM BELIZE: ESTUDO DE CASO319

Avaliação do projeto atual e proposta para o tratamento de esgoto da cidade de Belmopan e da cidade de Belize, em Belize	319
Avaliação das condições operacionais atuais na ETE da cidade de Belize, avaliação da extensão do acúmulo de lodo no sistema de lagoas de estabilização e sugestão de técnicas econômicas de remoção e disposição final de lodo	337
Revisão dos métodos de amostragem e tecnologias atuais; sugestões em termos de parâmetros de medição, taxa de amostragem e pontos de amostragem mais recomendados	347
Referências	348

CAPÍTULO 11 – ETE DE MANGABEIRA: ESTUDO DE CASO	351
Avaliação do sistema de lagoas de estabilização da ETE de Mangabeira, João Pessoa (Paraíba)	351
Estimativa de cálculos para definir as condições de funcionamento da ETE de Mangabeira (por módulo)	359
Conclusões	362
Referências	363

CAPÍTULO 1

CARACTERÍSTICAS DOS ESGOTOS SANITÁRIOS

Luciana Coêlho Mendonça

Sérgio Rolim Mendonça

GENERALIDADES, DEFINIÇÃO E ORIGEM

Águas residuais ou esgotos sanitários podem ser definidas como aquelas águas provenientes do sistema de abastecimento de água da população, que, depois de modificadas por diversos usos em atividades domésticas, industriais e comunitárias, são recolhidas pela rede de esgotamento que as conduz a um destino apropriado (MARA, 1976).

Segundo sua origem, as águas residuais resultam da combinação de líquidos e resíduos sólidos transportados pela água, provenientes de residências, escritórios, edifícios comerciais e instituições, com resíduos das indústrias, águas subterrâneas, superficiais ou de precipitação que também podem, eventualmente, ser agregadas ao esgoto sanitário (MENDONÇA, 1987).

Assim, de acordo com sua origem, as águas residuais podem ser classificadas como:

- domésticas: águas utilizadas para fins higiênicos (sanitários, cozinhas, lavanderias etc.). Consistem basicamente em resíduos humanos que chegam às redes de esgotamento por meio das descargas das instalações hidráulicas das edificações e em resíduos oriundos de estabelecimentos comerciais, públicos e similares;
- industriais: resíduos líquidos gerados nos processos industriais. Possuem características específicas, dependendo do tipo de indústria;
- infiltrações e vazões adicionais: as águas de infiltração penetram no sistema de esgotamento por juntas de tubulações, defeitos nas paredes das tubulações, tu-

bulações de inspeção e limpeza, caixas de passagem, estruturas dos poços de visita, estações de bombeamento etc. Há também as águas pluviais que são descarregadas por meio de várias fontes, como calhas, drenos e coletores;

- pluviais: consistem em águas pluviais que descarregam grandes quantidades de água sobre o solo. Parte dessas águas é drenada e outra escorre pela superfície, arrastando areia, terra, folhas e outros resíduos que podem estar sobre o solo.

Segundo Mara e Cairncross (1990), cada pessoa gera 1,8 litro de material fecal diariamente, correspondendo a 350 gramas de sólidos secos, incluindo 90 gramas de matéria orgânica e 20 gramas de nitrogênio e de outros nutrientes, principalmente fósforo e potássio.

A temperatura das águas residuais geralmente é um pouco superior à temperatura das águas de abastecimento em virtude da contribuição dos resíduos domésticos que tiveram as águas aquecidas. Valores reais elevados podem ser verificados quando há contribuição de esgotos industriais. Em geral, a temperatura das águas residuais é superior à temperatura do ar, exceto nos dias mais quentes de verão. Em relação aos processos de tratamento, sua influência se verifica nos processos químicos e nos de natureza biológica, pois a velocidade das reações aumenta com a elevação da temperatura; nas operações em que ocorre o fenômeno da sedimentação, o aumento da temperatura diminui a viscosidade, melhorando as condições para esse fenômeno.

Os esgotos domésticos geralmente são perenes, sendo sua composição essencialmente orgânica e seu fluxo relativamente constante, quando há controle domiciliar de água por meio de medidores. Os esgotos industriais podem ser perenes, mas são resultado do trabalho da própria indústria, o que os torna intermitentes e com contribuições localizadas de grandes volumes, ao contrário dos esgotos domésticos. Os esgotos provenientes da infiltração são extremadamente variáveis, dependendo, principalmente, do tipo de solo, do nível do lençol freático e das condições climáticas. Os esgotos provenientes das águas pluviais são tipicamente intermitentes e sazonais, variando de acordo com a precipitação atmosférica e com a cultura da população. Sua composição varia também segundo a duração das chuvas.

De acordo com o tipo de despejos coletados, os sistemas de esgotamento podem ser classificados em:

- sistema único ou combinado: as águas pluviais e os esgotos domésticos são transportados conjuntamente pelo mesmo sistema;
- sistema parcialmente separador: no qual é admitida na rede apenas a fração das águas pluviais provenientes de telhados e pisos dos domicílios;
- sistema separador absoluto: as águas pluviais e os esgotos domésticos são conduzidos em tubulações independentes.

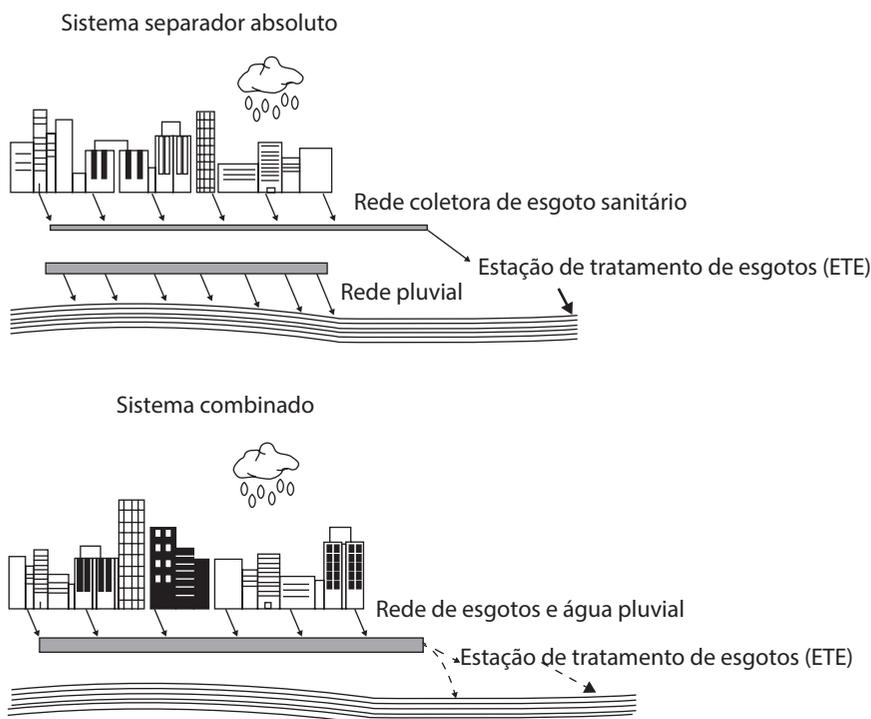
Segundo Azevedo Netto e Alvarez (1973), as principais vantagens do sistema separador absoluto são:

- permitir a construção de partes independentes, como coletores sanitários, onde sejam convenientes, e galerias de águas pluviais onde sejam necessárias;

- facilitar a construção por etapas, de acordo com a disponibilidade e a conveniência financeira, assegurando melhor viabilidade;
- apresentar melhores condições para o emprego de tubulações de mais baixo custo e fácil instalação;
- manter melhor as tensões trativas mínimas nas tubulações;
- poder ser assentado sem nenhum problema nas vias públicas não pavimentadas e sem leito definido;
- assegurar melhores formas de controle da contaminação das águas para o tratamento, reduzindo o custo das Estações de Tratamento de Esgotos (ETE).

De maneira geral, nos países de clima tropical e em desenvolvimento, é mais favorável usar o sistema separador absoluto em razão dos escassos recursos disponíveis. Além disso, em regiões onde as precipitações atmosféricas são mais intensas, os custos seriam muito mais elevados por conta do aumento dos fluxos das águas pluviais.

Na Figura 1.1, são apresentados os sistemas de esgotamento separador absoluto e combinado.



Fonte: adaptada de Von Sperling (1995).

Figura 1.1 – Sistemas de esgotamento: separador absoluto e combinado

O esgoto fresco, como o nome indica, é a fase após os resíduos sólidos e líquidos serem adicionados à água, produzindo água residual. Esse esgoto contém oxigênio dissolvido e permanece fresco tanto tempo quanto existir a decomposição aeróbia. No esgoto séptico, o oxigênio dissolvido foi completamente esgotado e se estabeleceu a decomposição anaeróbia dos sólidos, com produção de sulfeto de hidrogênio e de outros gases.

ODOR

Os odores característicos do esgoto são causados pelos gases formados no processo de decomposição anaeróbia. Jordão e Pessoa (1995) apresentam os principais tipos de odores:

- odor de mofo: razoavelmente suportável; típico de água residual fresca;
- odor de ovo podre: “insuportável”; típico de água residual séptica, que ocorre em virtude da formação do gás sulfídrico, proveniente da decomposição anaeróbia da matéria orgânica contida no esgoto;
- odores variados: de produtos decompostos, como verduras, legumes, peixes; de matéria fecal; de produtos rançosos; de produtos sulfurosos, nitrogenados, ácidos orgânicos etc.

Odores diferentes e específicos ocorrem em razão da presença de resíduos industriais.

APARÊNCIA

A água residual tem aparência desagradável e é extremamente perigosa, principalmente, por causa do elevado número de organismos patogênicos (vírus, bactérias, protozoários, helmintos) causadores de enfermidades.

O esgoto fresco tem tonalidade acinzentada, ao passo que a cor do esgoto séptico varia gradualmente de cinza a preta.

As águas residuais podem, contudo, apresentar qualquer outra cor nos casos de contribuição de esgotos industriais, como, por exemplo, de indústria têxtil ou de tintas.

CONCEITO DE POLUIÇÃO

A palavra poluição é proveniente do termo em latim *polluo*, que significa sujar ou manchar. Segundo o dicionário da Real Academia Española (1992), poluição é a contaminação intensa e nociva da água ou do ar, produzida pelos resíduos de processos industriais ou biológicos.

Carvalho (1981) define poluição como qualquer interferência prejudicial nos processos de transmissão de energia em um ecossistema. Pode também ser entendida

como um conjunto de fatores limitantes de interesse especial para o homem, constituídos de substâncias nocivas que, uma vez introduzidas no ambiente, podem ser prejudiciais ao homem ou ao seu *habitat* de modo efetivo e potencial.

De acordo com a Lei n. 6.938 (BRASIL, 1981), poluição é a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que, direta ou indiretamente:

- prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- criem condições adversas às atividades sociais e econômicas;
- afetem desfavoravelmente a biota;
- deterioreem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente;
- lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos.

A poluição proveniente dos resíduos domésticos, apesar de geralmente ser menos nociva ao meio ambiente que a poluição industrial, pode causar grandes danos aos ecossistemas, pois possui, em sua composição, matéria orgânica e micro-organismos patogênicos.

Há basicamente duas formas em que a fonte de poluentes pode afetar um corpo de água: poluição pontual e poluição difusa. Na contaminação pontual, os poluentes afetam o corpo de água de forma concentrada no espaço; é um exemplo a descarga dos resíduos de uma comunidade no rio. Na poluição difusa, os contaminantes são distribuídos ao longo da extensão do corpo de água; caso típico da poluição causada pela drenagem pluvial natural.

CARACTERÍSTICAS QUALITATIVAS E QUANTITATIVAS

A primeira medida tomada no início de um levantamento de dados para a elaboração de um projeto de sistema de tratamento de esgotos se relaciona com a determinação da qualidade e da quantidade de esgoto a ser encaminhada à estação de tratamento. Isso possibilita um dimensionamento mais próximo da realidade e não baseado apenas em dados obtidos da bibliografia.

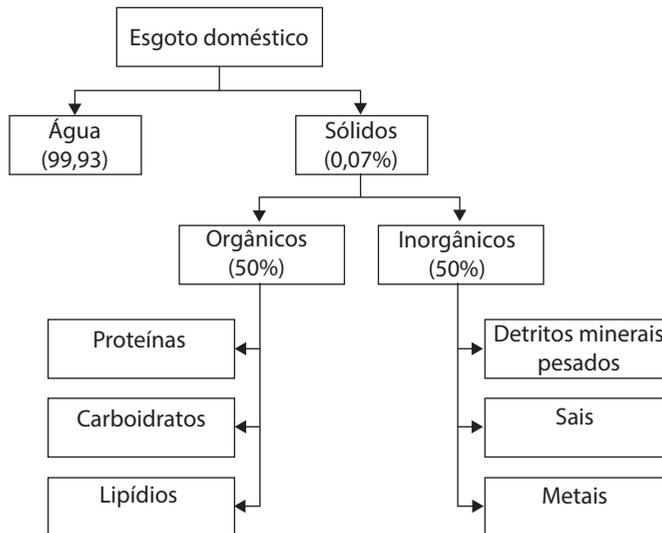
As características dos esgotos domésticos são determinadas a partir de uma sequência de procedimentos, que inclui medições locais de vazão, coleta de amostras, análises e interpretação dos resultados obtidos. O conjunto dessas atividades é denominado caracterização qualitativa e quantitativa das águas residuais (HANAI, 1997). As características físico-químicas e biológicas informam sobre os processos e as operações que devem ser utilizados no tratamento de esgoto.

A composição e a concentração dos componentes dos despejos domésticos dependem fortemente das condições socioeconômicas da população, assim como da existência do lançamento de efluentes industriais na rede de esgotamento. Em regiões industrializadas, a fração de resíduos industriais presentes nas águas residuais domésticas pode ser bastante significativa, alterando por completo suas características.

CARACTERÍSTICAS QUALITATIVAS

Os esgotos domésticos são constituídos de elevada porcentagem (em peso) de água, aproximadamente 99,93%, e apenas 0,07% de sólidos suspensos, coloidais e dissolvidos. No entanto, é por causa dessa pequena fração de sólidos que ocorrem os problemas de poluição, levando à necessidade do tratamento do esgoto. A água é apenas o meio de transporte dos sólidos.

Na Figura 1.2, é apresentada a composição geral dos esgotos domésticos.



Fonte: adaptada de Metcalf & Eddy, Inc. (2003).

Figura 1.2 – Composição dos esgotos domésticos

Dados típicos da composição do esgoto doméstico e do esgoto industrial são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 1.1 e 1.2. Dependendo da concentração dos componentes, o esgoto doméstico pode ser classificado como forte, médio ou diluído. Os componentes e as concentrações podem variar durante o dia, em diferentes dias da semana e em diferentes períodos sazonais. A distribuição dos sólidos no esgoto doméstico pode ser apresentada, de forma aproximada, segundo a classificação da Figura 1.3.

O esgoto doméstico é composto de constituintes físicos, químicos e biológicos. É uma mistura de materiais orgânicos e inorgânicos, suspensos ou dissolvidos na água. A maior parte dessa matéria consiste em resíduos alimentícios, fezes, matéria vegetal, sais minerais e materiais diversos, como sabões e detergentes sintéticos.

As proteínas são o principal componente do organismo animal, mas estão presentes também nas plantas. O gás sulfídrico presente no esgoto é proveniente do enxofre fornecido pelas proteínas. Os carboidratos são as primeiras substâncias a serem des-

truídas pelas bactérias, com produção de ácidos orgânicos; por essa razão, as águas residuais sépticas apresentam maior acidez. Entre os principais exemplos, podem ser citados os açúcares, o amido, a celulose e a fibra da madeira.

Tabela 1.1 – Composição típica do esgoto doméstico

Componente	Unidade	Concentração		
		Forte	Médio	Diluído
Sólidos totais	mg/L	1.230	720	390
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	860	500	270
Sólidos dissolvidos fixos	mg/L	520	300	160
Sólidos dissolvidos voláteis	mg/L	340	200	110
Sólidos suspensos	mg/L	400	210	120
Sólidos suspensos fixos	mg/L	85	50	25
Sólidos suspensos voláteis	mg/L	315	160	95
Sólidos sedimentáveis	mL/L	20	10	5
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO ₅)	mg/L	350	190	110
Carbono orgânico total (COT)	mg/L	260	140	80
Demanda química de oxigênio (DQO)	mg/L	800	430	250
Nitrogênio total	mg/L	70	40	20
Nitrogênio orgânico	mg/L	25	15	8
Nitrogênio amoniacal	mg/L	45	25	12
Nitritos	mg/L	0	0	0
Nitratos	mg/L	0	0	0
Fósforo total	mg/L	12	7	4
Fósforo orgânico	mg/L	4	2	1
Fósforo inorgânico	mg/L	10	5	3
Cloretos*	mg/L	90	50	30
Sulfatos*	mg/L	50	30	20
Óleos e graxas	mg/L	100	900	50
Compostos orgânicos voláteis	mg/L	> 400	100 a 400	< 100
Coliformes totais	Nº/100 mL	10 ⁷ a 10 ⁹	10 ⁷ a 10 ⁸	10 ⁶ a 10 ⁷
Coliformes fecais	Nº/100 mL	10 ⁵ a 10 ⁸	10 ⁴ a 10 ⁶	10 ³ a 10 ⁵
Óocitos de <i>cryptosporidium</i>	Nº/100 mL	10 ¹ a 10 ²	10 ¹ a 10 ¹	10 ¹ a 10 ⁰
Cistos de <i>Giardia lamblia</i>	Nº/100 mL	10 ¹ a 10 ³	10 ¹ a 10 ²	10 ¹ a 10 ¹

* Valores podem ser maiores em função da quantidade de constituintes presentes no sistema de abastecimento de água.

Fonte: Metcalf & Eddy, Inc. (2003).

Tabela 1.2 – Resultados de um levantamento de resíduos industriais na rede pública de esgotamento de uma cidade com população de 145 mil habitantes

Tipo de indústria	Vazão (m ³ /dia)	DBO*		Sólidos suspensos		DQO** (mg/L)	Óleos e graxas (mg/L)
		(mg/L)	(kg/dia)	(mg/L)	(kg/dia)		
Abatedouro de bovinos	4.542	1.300	5.897	960	4.355	2.500	460
Extração de óleo de soja	1.809	220	399	140	254	440	–
Produtos de borracha	715	200	141	250	177	300	–
Sorvete	522	910	476	260	136	1.830	–
Queijo	416	3.160	1.315	970	404	5.600	–
Laminação de metais	409	8	3	27	11	36	–
Tapeçarias	390	140	54	60	23	490	–
Doces	370	1.560	576	260	95	2.960	200
Fábrica de motos	354	30	10	26	9	70	–
Batatas fritas	342	600	204	680	231	1.260	–
Farinha	315	330	104	330	113	570	–
Laticínios	246	1.400	345	310	77	3.290	–
Lavanderias industriais	189	770	132	450	86	2.400	520
Indústrias farmacêuticas	154	270	41	150	23	390	160
Abatedouro de aves	134	200	27	310	41	450	–
Refeições	79	270	21	60	5	420	–
Refrigerantes	61	480	29	480	29	1.000	–
Engarrafamento de leite	48	230	11	110	6	420	–

* DBO: demanda bioquímica de oxigênio

** DQO: demanda química de oxigênio

Fonte: adaptada de Hammer e Hammer Jr. (1977).

Os lipídios (óleos e graxas) incluem grande número de diferentes substâncias. Essas substâncias geralmente têm como principal característica comum a insolubilidade em água, mas são solúveis em certos solventes como clorofórmio, álcoois e benzeno. Estão sempre presentes nas águas residuais domésticas em razão do uso de manteiga, azeites vegetais em cozinhas etc. Podem também estar presentes na forma de óleos minerais derivados de petróleo por conta de contribuições não permitidas (de postos de gasolina, por exemplo) e são altamente indesejáveis, pois se aderem às tubulações e provocam obstruções. As graxas não são desejáveis já que provocam mau odor, formam espuma, inibem a vida dos micro-organismos (no caso de tratamento biológico do esgoto), influenciam a manutenção, entre outros.

Os surfactantes (agentes tensoativos) são constituídos de moléculas orgânicas com a propriedade de formar espuma no corpo receptor ou na estação de tratamento em que o esgoto é lançado. Tendem a se agregar à interface ar-água e, nas unidades de aeração, aderem-se à superfície das bolhas de ar, formando uma espuma muito estável e difícil de ser rompida. O tipo mais comum é o alquil-benzeno-sulfonado (ABC), que é típico de detergentes sintéticos, apresenta resistência à ação biológica e tem sido substituído pelos do tipo alquil-sulfonado-linear (LAS), que são biodegradáveis.

Os fenóis, por sua vez, são compostos orgânicos originados, principalmente, nos efluentes industriais. Têm a propriedade de causar sabor característico à água, embora em baixa concentração, em especial a água clorada.

Os pesticidas e demais compostos químicos orgânicos são utilizados principalmente na agricultura e, assim, não costumam chegar aos sistemas de esgotamento. No entanto, chegam a rios e corpos receptores, sendo uma fonte de poluição e de toxicidade.

A matéria inorgânica presente nas águas residuais é formada principalmente pela presença de areia e de substâncias minerais dissolvidas. A areia é proveniente de águas de lavagem das ruas e de águas da superfície e do subsolo que chegam à rede coletora de modo indevido ou que se infiltram pelos poços de visita ou pelas juntas das tubulações.

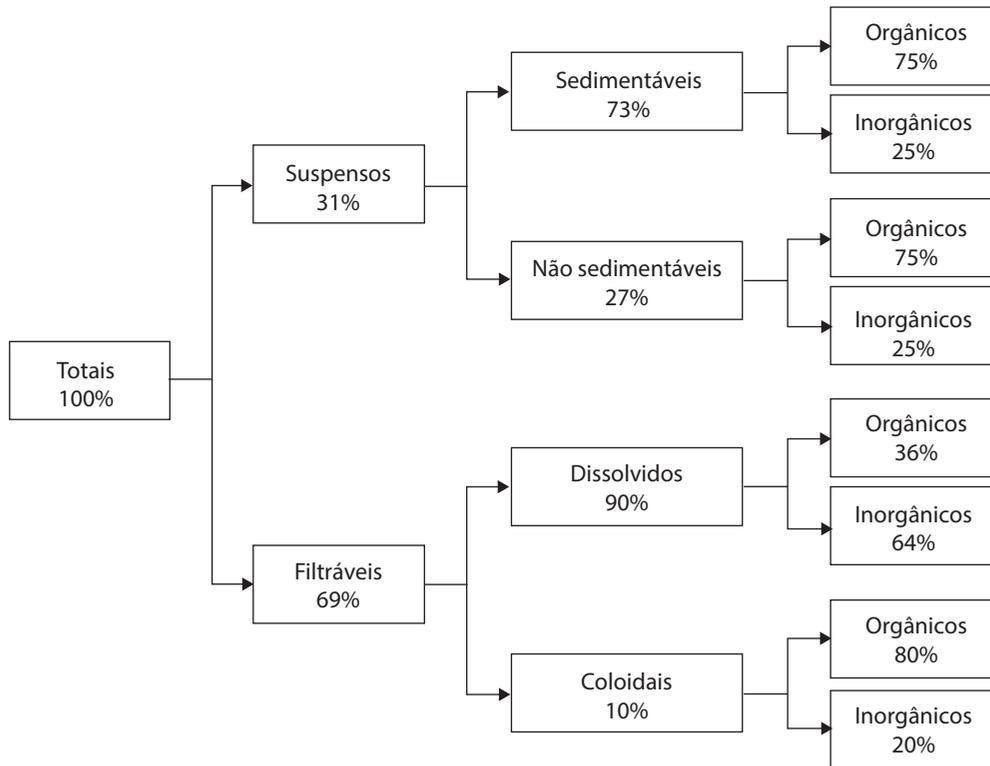
O esgoto contém também pequenas concentrações de vários gases dissolvidos. O mais importante é o oxigênio proveniente do ar que, eventualmente, entra em contato com a superfície do esgoto em movimento. Além do oxigênio, o esgoto pode conter outros gases: dióxido de carbono, resultante da decomposição de matéria orgânica; nitrogênio dissolvido da atmosfera; gás sulfídrico formado pela decomposição de componentes orgânicos; gás amoníaco; e certas substâncias inorgânicas do enxofre. Esses gases, embora em pequenas quantidades, estão relacionados com a decomposição e o tratamento dos componentes degradáveis do esgoto.

Os contaminantes importantes de interesse no tratamento do esgoto são apresentados no Quadro 1.1. As propriedades físicas e os componentes químicos e biológicos do esgoto e suas fontes estão expostos no Quadro 1.2. Os efeitos gerados pelos principais poluentes presentes no esgoto podem ser observados no Quadro 1.3.

CARACTERÍSTICAS QUANTITATIVAS

Contribuição *per capita*. Relação esgoto/água

A contribuição dos esgotos domésticos depende fundamentalmente do sistema de abastecimento de água. A água usada nas habitações é posteriormente encaminhada às instalações prediais e dirigida para as redes de esgotamento. Conseqüentemente, há uma nítida correlação entre o consumo *per capita* de água e a contribuição para a rede de esgotamento.



Fonte: adaptada de Metcalf & Eddy, Inc. (1991).

Figura 1.3 – Classificação dos sólidos presentes nos esgotos domésticos

O consumo *per capita* é um parâmetro extremamente variável entre as diferentes localidades e depende de diversos fatores, como os citados por Tsutiya e Alem Sobrinho (1999):

- hábitos higiênicos e culturais da população;
- quantidade de micromedição do sistema de abastecimento de água;
- instalações e equipamentos hidráulico-sanitários dos imóveis;
- controle exercido sobre o consumo;
- valor da tarifa e existência ou não de subsídios sociais ou políticos;
- abundância ou escassez de mananciais;
- intermitência ou regularidade do abastecimento de água;
- temperatura média da região;
- renda familiar;
- disponibilidade de equipamentos domésticos que utilizam água em quantidade apreciável;

- índices de industrialização;
- intensidade e tipo de atividade comercial.

Quadro 1.1 – Contaminantes importantes de interesse no tratamento do esgoto

Contaminante	Motivo de importância
Sólidos suspensos	Sólidos suspensos podem levar ao desenvolvimento de depósitos de lodo e condições anaeróbias, quando esgotos não tratados são lançados no ambiente aquático.
Orgânicos biodegradáveis	Compostos principalmente de proteínas, carboidratos e lipídios, os materiais orgânicos biodegradáveis são medidos mais comumente em termos de DBO e DQO. Quando lançados sem tratamento no meio ambiente, sua estabilização biológica pode levar ao consumo das fontes de oxigênio natural e ao desenvolvimento de condições sépticas.
Micro-organismos patógenos	Enfermidades podem ser transmitidas pelos organismos patógenos existentes no esgoto.
Nutrientes	Nitrogênio e fósforo aliados ao carbono são nutrientes essenciais para o crescimento. Quando lançados no ambiente aquático, esses nutrientes podem levar ao crescimento de vida aquática indesejável. Quando lançados em quantidades excessivas no solo, podem também contaminar a água subterrânea.
Contaminantes importantes	Compostos orgânicos e inorgânicos selecionados em função de seu conhecimento ou suspeita de carcinogenicidade, mutagenicidade, teratogenicidade ou elevada toxicidade. Muitos desses compostos são encontrados no esgoto.
Orgânicos refratários	Esses materiais tendem a resistir a métodos convencionais de tratamento de esgoto. Exemplos típicos são detergentes, fenóis e pesticidas agrícolas.
Metais pesados	Os metais pesados geralmente são adicionados ao esgoto de atividades comerciais e industriais e devem ser removidos se houver reúso do esgoto.
Inorgânicos dissolvidos	Componentes inorgânicos como cálcio, sódio e sulfato são adicionados aos sistemas domésticos de abastecimento de água e devem ser removidos se houver reúso do esgoto.

Fonte: Metcalf & Eddy, Inc. (1991).

Quadro 1.2 – Características físicas, químicas e biológicas do esgoto e suas fontes

	Características	Fontes
Propriedades físicas	Cor	Esgotos domésticos e industriais, decomposição natural de materiais orgânicos
	Odor	Esgotos sépticos, esgotos industriais
	Sólidos	Sistemas domésticos de abastecimento de água, esgotos domésticos e industriais, erosão do solo, infiltração
	Temperatura	Esgotos domésticos e industriais

(continua)

Quadro 1.2 – Características físicas, químicas e biológicas do esgoto e suas fontes (*continuação*)

	Características	Fontes
Constituintes químicos orgânicos	Carboidratos Óleos e graxas Pesticidas Fenóis Proteínas Contaminantes importantes Surfactantes Compostos orgânicos voláteis Outros	Esgotos domésticos, comerciais e industriais Esgotos domésticos, comerciais e industriais Esgotos agrícolas Esgotos industriais Esgotos domésticos, comerciais e industriais Esgotos domésticos, comerciais e industriais Esgotos domésticos, comerciais e industriais Esgotos domésticos, comerciais e industriais Decomposição natural de materiais orgânicos
Constituintes químicos inorgânicos	Alcalinidade Cloretos Metais pesados Nitrogênio pH Fósforo Enxofre	Esgotos domésticos, sistemas domésticos de abastecimento de água, infiltração de água subterrânea Esgotos domésticos, sistemas domésticos de abastecimento de água, infiltração de água subterrânea Esgotos industriais Esgotos domésticos e agrícolas Esgotos domésticos, comerciais e industriais Esgotos domésticos, comerciais e industriais; escoamento superficial Sistemas domésticos de abastecimento de água, esgotos domésticos, comerciais e industriais
Gases	Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S) Metano (CH ₄) Oxigênio (O ₂)	Decomposição de esgotos domésticos Decomposição de esgotos domésticos Sistemas domésticos de abastecimento de água, infiltração de águas de superfície
Constituintes biológicos	Animais Plantas	Canais e estações de tratamento de água Canais e estações de tratamento de água
Protistas	Eubactéria Archaeobactéria Vírus	Esgotos domésticos, infiltração de águas de superfície, estações de tratamento Esgotos domésticos, infiltração de águas de superfície, estações de tratamento Esgotos domésticos

Fonte: adaptado de Metcalf & Eddy, Inc. (1991).

Quadro 1.3 – Efeitos causados pelos contaminantes presentes no esgoto

Contaminantes	Parâmetro de caracterização	Tipo de efluentes	Consequências
Sólidos suspensos	Sólidos suspensos totais	Domésticos Industriais	Problemas estéticos Depósitos de lodo Adsorção de contaminantes Proteção de patógenos
Sólidos flotantes	Óleos e graxas	Domésticos Industriais	Problemas estéticos
Matéria orgânica biodegradável	DBO	Domésticos Industriais	Consumo de oxigênio Mortalidade de peixes Condições sépticas
Patógenos	Coliformes	Domésticos	Enfermidades transmitidas pela água
Nutrientes	Nitrogênio Fósforo	Domésticos Industriais	Crescimento excessivo de algas (eutrofização do corpo receptor) Toxicidade para os peixes (amônia) Enfermidades em recém-nascidos (nitratos) Contaminação da água subterrânea
Compostos não biodegradáveis	Pesticidas Detergentes Outros	Industriais Agrícolas	Toxicidade (vários) Espumas (detergentes) Redução da transferência de oxigênio (detergentes) Não biodegradabilidade Maus odores (exemplo: fenóis)
Metais pesados	Elementos específicos (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn etc.)	Industriais	Toxicidade Inibição ao tratamento biológico do esgoto Problemas com a disposição do lodo na agricultura Contaminação da água subterrânea
Sólidos inorgânicos dissolvidos	Sólidos dissolvidos totais Condutividade elétrica	Reutilizados	Salinidade excessiva: prejuízo para plantações (irrigação) Toxicidade às plantas (alguns íons) Problemas de permeabilidade do solo (sódio)

Fonte: adaptado de Barros et al. (1995); Von Sperling (1995).

A Tabela 1.3 apresenta valores de consumo de água de alguns estabelecimentos comerciais e institucionais.

Tradicionalmente, as vazões do esgoto são estimadas em função das vazões de abastecimento de água. O consumo *per capita* mínimo adotado para o abastecimento de água de pequenas populações é de 80 L/hab.dia, podendo alcançar um máximo de 350 L/hab.dia. Para cidades com população superior a 100 mil habitantes, o valor mínimo usualmente adotado é de 150 L/hab.dia. De acordo com dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2014), o consumo médio *per capita* no Brasil em 2013 foi de aproximadamente 166,3 L/hab.dia. As médias nas diferentes regiões do país são bastante distintas em virtude das diferentes realidades de cada uma. As

regiões com dados mais discrepantes foram Nordeste, com consumo médio de 125,8 L/hab.dia, e Sudeste, com 194 L/hab.dia.

Tabela 1.3 – Estimativa de consumo de água em estabelecimentos comerciais e institucionais

	Estabelecimento	Unidade	Faixa de vazão (L/unidade ao dia)
Comerciais	Aeroporto	passageiro	8 – 15
	Alojamento	residente	80 – 150
	Banheiro público	usuário	10 – 25
	Bar	freguês	5 – 25
	Cinema/teatro	assento	2 – 10
	Escritório	empregado	30 – 70
	Hotel	hóspede	100 – 200
		empregado	30 – 50
	Indústria (apenas esgotos domésticos)	empregado	50 – 80
	Lanchonete	freguês	4 – 20
	Lavanderia – comercial	máquina	2.000 – 4.000
	Lavanderia – automática	máquina	1.500 – 2.500
	Loja	banheiro	1.000 – 2.000
		empregado	30 – 50
	Loja de departamento	banheiro	1.600 – 2.400
		empregado	30 – 50
		m ² de área	5 – 12
Posto de gasolina	veículo servido	25 – 50	
Restaurante	refeição	15 – 30	
Shopping center	empregado	30 – 50	
	m ² de área	4 – 10	
Institucionais	Clínica de repouso	residente	200 – 450
		empregado	20 – 60
	Escola com lanchonete, ginásio, chuveiros	estudante	50 – 100
	Escola com lanchonete, sem ginásio e chuveiros	estudante	40 – 80
	Escola sem lanchonete, ginásio e chuveiros	estudante	20 – 60
	Hospital	leito	300 – 1.000
		empregado	20 – 60
	Prisão	detento	200 – 500
empregado		20 – 60	

Campos (1994) comenta que os valores geralmente adotados para o coeficiente de consumo de água *per capita* variam de 150 L/hab.dia a 350 L/hab.dia.

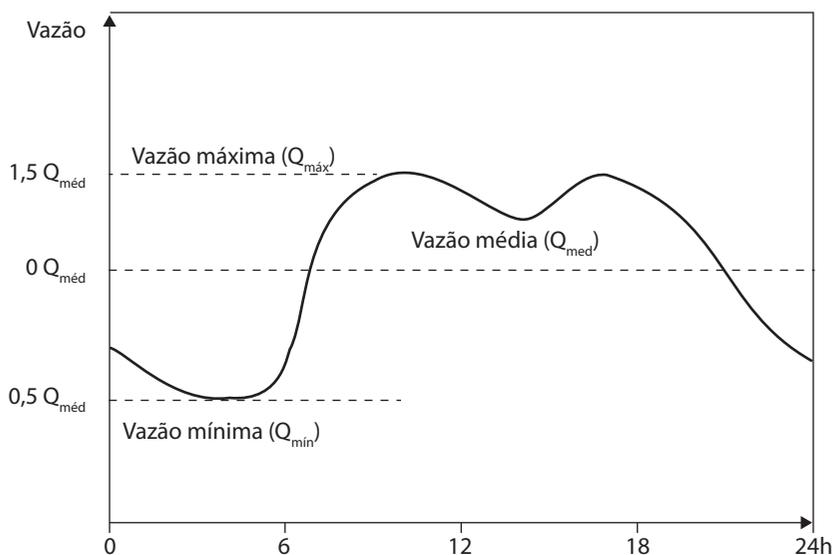
A relação esgoto/água, conhecida como relação água/esgoto, é denominada coeficiente de retorno “C”. O coeficiente de retorno é a relação entre o volume de esgoto recebido na rede de esgotamento e o volume de água efetivamente fornecido à população. Do total de água distribuída, parte não entra no sistema de esgotamento. No caso dos esgotos domésticos, essa água é desviada para lavar veículos, calçadas e ruas, irrigar jardins e parques públicos, encher radiadores, encher piscinas, parte infiltra-se no subsolo etc. Nas indústrias, parte da água é destinada para a alimentação de caldeiras a vapor, podendo também ser empregada em vários processos de fabricação. De modo geral, o coeficiente de retorno está na faixa de 0,5 a 0,9, dependendo das condições locais. Em áreas residenciais com muitos jardins, os valores são menores, ao passo que nas áreas centrais densamente povoadas os valores tendem a ser mais elevados (TSUTIYA; ALEM SOBRINHO, 1999). O valor comumente utilizado nos projetos é 0,8.

O volume do esgoto pode ser aumentado por despejos clandestinos de diversas origens, como indústrias e instalações privadas com abastecimento próprio de água e conexão inadequada de tubulações de águas pluviais na rede coletora.

Variação da vazão

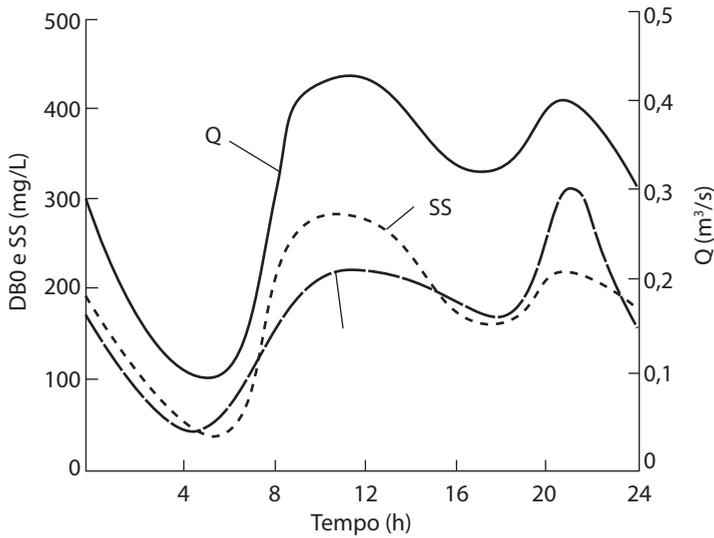
De modo geral, nas vazões do esgoto ocorrem variações horárias (segundo as horas do dia), diárias (segundo os dias da semana) e sazonais (segundo as estações do ano), de acordo com os usos e costumes da população, da temperatura e da precipitação atmosférica da região.

A Figura 1.4 exibe variação horária típica dos esgotos domésticos; na Figura 1.5 apresenta sua variação horária de vazão, DBO e de sólidos suspensos (SS).



Fonte: Campos (1994).

Figura 1.4 – Variação horária típica da vazão dos esgotos domésticos



Fonte: adaptada de Metcalf & Eddy, Inc. (1979).

Figura 1.5 – Variação típica horária de vazão, DBO e sólidos suspensos (SS) dos esgotos domésticos

Vazão de projeto

Nos projetos dos sistemas de esgoto sanitário, é de suma importância a estimativa das vazões mínimas, médias e máximas, que são calculadas pelas equações 1.1, 1.2 e 1.3.

Vazão mínima:

$$Q_{\min} = C \cdot \frac{P \cdot q \cdot K_3}{86.400} + q_{\text{inf}} \cdot L + Q_{\text{ind}} \quad (1.1)$$

Vazão média:

$$Q_{\text{méd}} = C \cdot \frac{P \cdot q}{86.400} + q_{\text{inf}} \cdot L + Q_{\text{ind}} \quad (1.2)$$

Vazão máxima:

$$Q_{\text{máx}} = C \cdot \frac{P \cdot q \cdot K_1 \cdot K_2}{86.400} + q_{\text{inf}} \cdot L + Q_{\text{ind}} \quad (1.3)$$

Nessas equações:

Q_{\min} : vazão mínima do esgoto, L/s;

$Q_{\text{méd}}$: vazão média do esgoto, L/s;

$Q_{\text{máx}}$: vazão máxima do esgoto, L/s;

C: coeficiente de retorno;

P: população a ser atendida, hab.;

q: consumo médio diário de água *per capita*, L/hab.dia;

- K_1 : coeficiente de máxima vazão diária; é a relação entre a maior vazão diária verificada no ano e a vazão média diária anual, adimensional;
- K_2 : coeficiente de máxima vazão horária; é a relação entre a maior vazão observada em um dia e a vazão média horária do mesmo dia, adimensional;
- K_3 : coeficiente de mínima vazão horária; é a relação entre a vazão mínima e a vazão média anual, adimensional;
- q_{inf} : taxa de infiltração na rede de esgotamento, L/s.m;
- L : extensão total da rede de esgotamento, m;
- Q_{ind} : vazão da indústria, L/s.

As fórmulas apresentadas são comumente utilizadas para estimação da vazão de projeto, mas é importante que todos os parâmetros sejam medidos ou determinados *in loco*, para que os cálculos não resultem em erros maiores e evite-se sub ou superdimensionamento das unidades de coleta, transporte e tratamento do esgoto.

Na inexistência de dados locais obtidos em campo, a NBR 9.649 (ABNT, 1986) recomenda os seguintes valores: $C = 0,80$; $K_1 = 1,2$; $K_2 = 1,5$; $K_3 = 0,5$; q_{inf} de 0,00005 a 0,001 L/s.m. Esses valores são admitidos constantes ao longo do tempo, qualquer que seja a população da área.

Ao se projetar um sistema de esgotamento, é necessário conhecimento prévio da existência ou não de indústrias contribuintes. Caso existam, é preciso saber quantas são, o porte e as características (qualitativas e quantitativas) de seus efluentes. Em cada caso, deve ser verificada a existência dos esgotos industriais que podem ser lançados *in natura* na rede de esgotamento (muito raramente) ou se há necessidade de pré-tratamento.

Há ainda outra fração de contribuição do esgoto que pode ser adicionada às vazões mínima, média e máxima: as águas pluviais. Essas águas geralmente são encaminhadas indevidamente aos coletores prediais e penetram na rede de esgotamento por meio de tampões dos poços de visita, lançamentos clandestinos etc., aumentando consideravelmente as vazões estimadas nos projetos. Na Colômbia, Pérez (1988) estimou esse aumento como sendo 20% da vazão máxima por horário. No Brasil, é comum adotar, para esse aumento, de 5% a 25% da contribuição *per capita* do esgoto (AZEVEDO NETTO et al., 1984). Com relação ao aumento da vazão média, Santos e Mendonça (2012) observaram que, em períodos de elevada precipitação, um sistema de tratamento de esgoto em Aracaju, Sergipe, teve seu valor aumentado em 45%. Hammer (1979) comenta que as contribuições de águas pluviais em excesso podem criar diversos problemas, incluindo sobrecarga na rede de esgotamento com refluxo dos esgotos domésticos no subsolo, extravasamento para a rua, sobrecarga das estações de tratamento e extravasamento nas estações de bombeamento e estações de tratamento.

CARGAS ORGÂNICAS DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Cargas orgânicas das estações de tratamento de esgoto são geralmente expressas em quilograma (kg) de DBO por dia ou quilograma (kg) de sólidos suspensos por dia; a vazão é expressa em L/s ou m³/dia. O cálculo é feito de acordo com as equações 1.4 e 1.5.

$$\text{carga orgânica (kg/dia)} = \frac{\text{concentração (g/m}^3) \times \text{vazão (L/s)} \times 86.400 \text{ (s/dia)}}{10^6 \text{ (g/kg)}} \quad (1.4)$$

$$\text{carga orgânica (kg/dia)} = \frac{\text{concentração (mg/L)} \times \text{vazão (m}^3/\text{dia)}}{10^3 \text{ (mg/kg)}} \quad (1.5)$$

EXEMPLO 1.1

Um despejo líquido industrial possui vazão total de 24.400 m³/dia, DBO igual a 21.600 kg/dia e quantidade de sólidos suspensos (SS) igual a 13.400 kg/dia. A partir desses dados, calculam-se as concentrações de DBO e SS.

$$\text{DBO (concentração)} = \frac{21.600 \text{ (kg/dia)} \times 10^3 \text{ (mg/kg)}}{24.400 \text{ (m}^3/\text{dia)}} \cong 885 \text{ mg/L}$$

$$\text{SS (concentração)} = \frac{13.400 \text{ (kg/dia)} \times 10^3 \text{ (mg/kg)}}{24.400 \text{ (m}^3/\text{dia)}} \cong 549 \text{ mg/L}$$



EXEMPLO 1.2

Os esgotos domésticos de uma população residencial têm cota *per capita* média de 250 L/hab.dia, DBO de 200 mg/L e SS de 240 mg/L. A partir desses dados, estima-se a contribuição *per capita* em termos de DBO e SS.

$$\text{DBO (carga orgânica)} = \frac{200 \text{ (mg/L)} \times 0,250 \text{ (m}^3/\text{hab.dia)}}{10^3 \text{ (mg/kg)}} \times 10^3 \cong 50 \text{ g/hab.dia}$$

$$\text{SS (carga orgânica)} = \frac{240 \text{ (mg/L)} \times 0,250 \text{ (m}^3/\text{hab.dia)}}{10^3 \text{ (mg/kg)}} \times 10^3 \cong 60 \text{ g/hab.dia}$$



É importante lembrar que variações significativas ocorrem sempre nas estações de tratamento de esgoto, dependendo da dimensão do sistema, do tipo de esgoto, do diâmetro e da inclinação dos interceptores e dos tipos de contribuintes de esgoto. As cargas orgânicas diárias para as várias estações de tratamento de esgoto são estimadas usando dados horários por meio da Equação 1.6.

$$\lambda = \sum_{i=1}^{24} \frac{x_i q_i 3.600 \text{ (s/h)}}{10^3 \text{ (g/kg)}} \quad (1.6)$$

em que:

λ : carga orgânica diária, kg/dia;

x_i : concentração de matéria biodegradável, g/m³;

q_i : vazão, m³/s.

CONCENTRAÇÃO DOS ESGOTOS

Quanto mais alta for a quantidade de matéria orgânica contida em determinado esgoto, maior será sua concentração e, conseqüentemente, mais forte será o esgoto.

Em virtude da grande variedade de substâncias orgânicas presentes na maioria dos esgotos (por exemplo, esgotos domésticos), é totalmente impraticável determiná-las individualmente. Por essa razão, utiliza-se a denominação material orgânico, que é indicativo para a quantidade de todas as substâncias orgânicas juntas em um esgoto. Para quantificar a massa de material orgânico, na engenharia sanitária, utilizam-se amplamente os parâmetros de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO). Esses dois indicadores são geralmente expressos em mg/L ou g/m³ (VAN HAANDEL; MARAIS, 1999).

A determinação da DBO é realizada sob temperatura de 20 °C, com tempo de incubação de cinco dias. A concentração do esgoto de uma população depende principalmente do consumo de água. Assim, nos Estados Unidos, onde o consumo é elevado (350 a 400 L/hab.dia), o esgoto é diluído (a DBO varia de 200 mg/L a 250 mg/L), ao passo que em países em desenvolvimento o esgoto é geralmente forte (a DBO varia de 400 mg/L a 700 mg/L), pois o consumo de água é mais baixo (40 a 100 L/hab.dia) (MENDONÇA et al., 1990).

Análises típicas de esgoto de algumas cidades do Brasil e da Colômbia são apresentadas na Tabela 1.4. A Tabela 1.5 mostra análises em vários países de clima tropical e temperado.

Tabela 1.4 – Composição típica de esgoto de algumas cidades do Brasil e da Colômbia

Parâmetro	Concentração (mg/L)			
	Brasil		Colômbia	
	São Paulo	Florianópolis	Cali	Medellín
DBO	128 – 151	357	130 – 190	202
DQO	265 – 316	627	285 – 405	397
Sólidos suspensos totais	123 – 170	376	160 – 190	215
Nitrogênio (NTK)	25	54	14 – 15	21
Fósforo total	3,4	9,9	3	8

Tabela 1.5 – Análises de esgoto em países de clima tropical e temperado

Parâmetro	Concentração (mg/L)							
	Quênia: Nairóbi	Quênia: Nakuru	Índia: Kodungaiyur	Peru: Lima	Israel: Herzliya	Estados Unidos: Allentown	Reino Unido: Yeovil	Brasil: Campina Grande
DBO	448	940	282	175	285	213	324	288
Sólidos suspensos	550	662	402	196	427	186	321	313
Sólidos dissolvidos totais	503	611	1.060	1.187	1.094	502	-	1.195
Cloretos	50	62	205	-	163	96	315	368
Nitrogênio amoniaco	67	72	30	-	76	12	29	43

Fonte: adaptada de Mara (1976).

Outro fator que determina a concentração do esgoto doméstico é a DBO (quantidade de matéria orgânica) produzida diariamente por habitante. A DBO *per capita* varia de país para país, e as diferenças devem-se, principalmente, a variações em quantidade e qualidade do esgoto provenientes de cozinhas, e menos do esgoto oriundo dos despejos humanos, mesmo que as variações nas dietas sejam importantes. O conhecimento da contribuição da DBO *per capita* é de grande interesse na engenharia sanitária e ambiental, pois é um importante parâmetro utilizado nos projetos de sistemas de esgotos domésticos, influenciando diretamente o dimensionamento desses sistemas.

Afini Jr. (1989) obteve valores da DBO *per capita* no estado de São Paulo, em função das principais características das cidades, e apresentou os seguintes resultados: 45 g/hab.dia, para cidades pequenas; 60 g/hab.dia, para cidades médias e grandes; e 75 g/hab.dia, para cidades grandes com desenvolvimento expressivo.

A variação da carga de DBO (contribuição de matéria seca *per capita*) em vários países pode ser observada na Tabela 1.6.

Tabela 1.6 – Variação da contribuição *per capita* de DBO

País/Região	DBO (g/hab.dia)
Zâmbia	36
Quênia	23
Sudeste da Ásia	43
Índia	30 – 45
França	24 – 34
Grã-Bretanha	50 – 60
Estados Unidos	45 – 80
Holanda	54
Alemanha	54
Brasil	39 – 54

Fonte: adaptada de Mara (1976).

ANÁLISES DE DADOS DE CARGAS ORGÂNICAS DO ESGOTO

As análises de dados de esgoto envolvem a determinação de médias simples ou concentrações médias em função da vazão ou das cargas orgânicas. As cargas orgânicas já foram definidas pelas equações 1.4, 1.5 e 1.6.

- Concentração média simples: a média simples ou média aritmética de um número de medições individuais é dada pela equação 1.7.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.7)$$

em que:

\bar{X} : concentração média aritmética do constituinte;

n : número de observações;

x_i : concentração média do constituinte durante o período i .

Para analisar dados de determinado constituinte do esgoto, DBO e sólidos suspensos da Figura 1.5 (p. 34), por exemplo, o procedimento normal é coletar amostras horárias durante um dia, totalizando 24 amostras, somar os 24 valores médios horários e dividir esses valores por 24. Apesar de as médias aritméticas continuarem sendo usadas, elas têm pouco valor por causa da magnitude da vazão que, por ocasião da medição, não é levada em consideração. Se a vazão permanece constante, o uso de uma simples média é aceitável.

- Concentração média ponderada em função da vazão, para obtenção de valores representativos nas concentrações dos constituintes dos esgotos domésticos: a concentração média ponderada em função da vazão é estimada pela Equação 1.8.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (1.8)$$

em que:

\bar{X} : concentração média do constituinte em função da vazão;

n : número de observações;

x_i : concentração média do constituinte durante o período i ;

q_i : vazão média horária durante o período i .

O procedimento para calcular a concentração média ponderada de determinado constituinte do esgoto é multiplicar a concentração de cada uma das 24 amostras pela

vazão horária correspondente e, então, somar os 24 valores e dividi-los pela soma das 24 vazões individuais.

POPULAÇÃO EQUIVALENTE

Os esgotos industriais expressos em termos de vazão e massa de DBO não têm significado para o público. No entanto, a quantidade e a carga orgânica dos efluentes industriais podem ser relacionadas com o número de pessoas que seriam necessárias para contribuir com uma quantidade equivalente em termos hidráulicos e orgânicos (DBO). O valor da DBO *per capita* é muitas vezes utilizado sem questionamento nem verificação dos valores locais de determinada população.

Na grande maioria dos projetos de sistemas de tratamento de esgotos domésticos do Brasil, tem-se utilizado o valor clássico de 54 g/hab.dia, apesar de a tendência ser a adoção de valores menores, mais compatíveis com a realidade. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (1973) define a população equivalente como o número de habitantes cuja poluição orgânica (geralmente em termos de DBO) é igual à causada por determinada fonte poluidora. A população equivalente em termos de DBO é definida pela Equação 1.9.

$$\text{População equivalente (hab)} = \frac{\text{DBO (mg/L)} \times \text{vazão (m}^3\text{/dia)}}{45 \text{ (gDBO/hab.dia)}} \quad (1.9)$$

Além dos equivalentes populacionais, é interessante expressar a quantidade de esgoto industrial produzida por unidade de matéria-prima processada ou produto manufaturado.

Os dois exemplos a seguir ilustram a produção de resíduos e os cálculos da população equivalente.

EXEMPLO 1.3

Uma indústria de laticínios, que processa uma média de 113 toneladas de leite por dia, produz em média 246 m³ de efluentes industriais diariamente, com DBO de 1.400 mg/L. As principais operações do processo são engarrafamento do leite, fabricação de sorvete e pequena produção de queijo tipo ricota. A partir desses dados, calcula-se a vazão da água residual e a DBO por 1.000 kg de leite processado, a população equivalente da descarga industrial e a população hidráulica equivalente, admitindo-se consumo *per capita* médio de água igual a 200 L/hab.dia e contribuição de DBO *per capita* igual a 45 g/hab.dia.

$$\begin{aligned} \text{Vazão por 1.000 kg de leite} &= \frac{1.000 \text{ (kg)} \times 246 \text{ (m}^3\text{/dia)}}{113.000 \text{ (kg/dia)}} \cong \\ &\cong 2,18 \text{ m}^3\text{/1.000 kg de leite} \end{aligned}$$

$$\text{Carga orgânica de DBO} = \frac{1.400 \text{ (mg/L)} \times 246 \text{ (m}^3\text{/dia)}}{10^3 \text{ (mg/kg)}} \cong 344,4 \text{ kg DBO/dia}$$

$$\begin{aligned} \text{DBO por 1.000 kg de leite} &= \frac{1.000 \text{ (kg)} \times 344,4 \text{ (kg/dia)}}{113.000 \text{ (mg/kg)}} \cong \\ &\cong 3,05 \text{ kg DBO/1.000 kg de leite} \end{aligned}$$

$$\text{População equivalente (DBO)} = \frac{1.400 \text{ (mg/L)} \times 246 \text{ (m}^3\text{/dia)}}{45 \text{ (g/hab.dia)}} \cong 7.653 \text{ hab}$$

$$\text{População hidráulica equivalente} = \frac{246 \text{ (m}^3\text{/dia)} \times 1.000 \text{ (L/m}^3\text{)}}{200 \text{ L/hab.dia}} \cong 1.230 \text{ hab}$$



EXEMPLO 1.4

Um abatedouro sacrifica cerca de 500 toneladas de bovinos (peso vivo) por dia. A maior parte é vendida na forma de traseira e dianteira, e parte da produção é empacotada. O sangue é recuperado e vendido; o conteúdo não digerido do estômago é removido por meio de peneiras e disposto no solo; o restante do processo é decantado, recuperando os sólidos que sedimentam e os que flutam. Depois desse pré-tratamento, o resíduo é descarregado na rede de esgotamento municipal à razão de 4.500 m³/dia, com DBO igual a 1.300 mg/L. Com esses dados, calcula-se a DBO do despejo industrial por 1.000 kg de bovinos e as populações equivalente e hidráulica, admitindo-se quota *per capita* média de água igual a 200 L/hab.dia e contribuição *per capita* de DBO igual a 54 g/hab.dia.

$$\text{Carga orgânica de DBO} = \frac{1.300 \text{ (mg/L)} \times 4.500 \text{ (m}^3\text{/dia)}}{10^3 \text{ (mg/kg)}} \cong 5.850 \text{ kg DBO/dia}$$

$$\begin{aligned} \text{DBO por 1.000 kg de bovinos} &= \frac{1.000 \text{ (kg)} \times 5.850 \text{ (kg/dia)}}{500.000 \text{ (kg/dia)}} \cong \\ &\cong 11,7 \text{ kg DBO/1.000 kg de bovinos} \end{aligned}$$

$$\text{População equivalente (DBO)} = \frac{1.300 \text{ (mg/L)} \times 4.500 \text{ (m}^3\text{/dia)}}{54 \text{ (g/hab.dia)}} \cong 108.333 \text{ hab}$$

$$\text{População hidráulica equivalente} = \frac{4.500 \text{ (m}^3\text{/dia)} \times 1.000 \text{ (L/m}^3\text{)}}{200 \text{ L/hab.dia}} \cong 22.500 \text{ hab}$$



MEDIÇÃO DE CONCENTRAÇÃO DE CONTAMINANTES EM ESGOTOS

Os contaminantes nos esgotos geralmente são uma mistura completa de compostos orgânicos e inorgânicos. É, portanto, praticamente impossível obter uma análise química completa de qualquer tipo de esgoto. Por esse motivo, vários métodos empíricos foram desenvolvidos para avaliar a concentração de contaminantes nos esgotos sem haver a necessidade de ter conhecimento da composição química do esgoto específico.

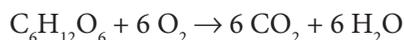
São abordados, em resumo, métodos analíticos para contaminantes orgânicos. Os métodos analíticos para outros contaminantes, tais como determinação de parâmetros físicos (solidez, cor, odor), bacteriológicos (coliformes) e testes para determinação do efeito dos poluentes em organismos vivos (testes de toxicidade por bioensaios), podem ser obtidos em American Public Health Association (1995).

Segundo Ramalho (1983), os métodos analíticos para contaminantes orgânicos podem ser classificados em dois grupos:

- Grupo 1 – métodos cujo parâmetro é o oxigênio:
 - demanda teórica de oxigênio (DTeO);
 - demanda química de oxigênio (DQO);
 - demanda bioquímica de oxigênio (DBO);
 - demanda total de oxigênio (DTO).
- Grupo 2 – métodos cujo parâmetro é o carbono:
 - carbono orgânico total (COT);
 - carbono orgânico teórico (COTe).

DEMANDA TEÓRICA DE OXIGÊNIO

A demanda teórica de oxigênio (DTeO) corresponde à quantidade estequiométrica de oxigênio necessário para oxidar completamente determinado composto. É a quantidade teórica de oxigênio requerida para transformar completamente a fração orgânica de esgoto em gás carbônico (CO₂) e água (H₂O). Assim, a equação para oxidação total da glicose é:



O peso molecular da glicose é igual a $6 \times 12 + 12 \times 1 + 6 \times 16 = 180$. O peso molecular do oxigênio é $6 \times 2 \times 16 = 192$. Dessa maneira, pode-se estimar que a DTeO de uma solução de 300 mg/L de glicose corresponde a 320 mg/L, isto é: $(192/180) \times 300 = 320$ mg/L.

A natureza do esgoto é tão complexa que a DTeO não pode ser calculada, mas, na prática, é aproximadamente igual à demanda química de oxigênio (DQO).

DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO

A demanda química de oxigênio (DQO) é obtida pela oxidação do esgoto em uma solução ácida de permanganato ou dicromato de potássio ($\text{Cr}_2\text{O}_7\text{K}_2$). Esse processo oxida quase todos os compostos orgânicos em gás carbônico (CO_2) e água (H_2O). A reação é completa em mais de 95% dos casos. A vantagem das medições de DQO é que os resultados são obtidos rapidamente (aproximadamente 3 horas) e indicam a quantidade necessária de oxigênio para estabilização da matéria orgânica; no entanto, há a desvantagem de oxidar a fração biodegradável e inerte da matéria orgânica e oxidar certos constituintes inorgânicos que podem interferir em seu resultado.

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO

Demanda bioquímica de oxigênio (DBO) é a quantidade de oxigênio usada na oxidação bioquímica da matéria orgânica sob determinadas condições de tempo e temperatura. Representa a quantidade de oxigênio requerida para estabilização da matéria orgânica por meio de processo biológico. É o principal teste usado para avaliação da natureza do esgoto.

Mede-se o oxigênio consumido pelas bactérias durante a oxidação da matéria orgânica presente no esgoto por cinco dias a 20 °C. Na determinação da DBO, são utilizados cinco dias de incubação, porque, dessa forma, mede-se mais facilmente a demanda bioquímica de oxigênio final (DBO_t), que representa o oxigênio necessário para a completa estabilização da matéria orgânica do esgoto. O conceito de DBO é originário do Reino Unido. Segundo Mara (1976), a Royal Commission escolheu cinco dias para a estimativa da DBO a 20 °C porque os rios britânicos têm um tempo de escoamento para o mar aberto inferior a cinco dias e a média da temperatura no verão é 18,3 °C.

A demanda de oxigênio das águas residuais ocorre por conta de três classes de materiais:

- matéria orgânica carbonácea usada como fonte de alimentação pelos organismos aeróbios;
- nitrogênio oxidável derivado de nitritos, amônia e compostos de nitrogênio orgânico, que servem de substrato para bactérias específicas dos gêneros *Nitrosomonas* e *Nitrobacter*, que oxidam o nitrogênio amoniacal em nitritos e nitratos;
- compostos redutores químicos, como sulfito (SO_3^{-2}), enxofre (S^{-2}) e íon ferroso (Fe^{+2}), que são oxidados por oxigênio dissolvido.

Para esgotos domésticos, praticamente toda a demanda de oxigênio ocorre em razão da matéria orgânica carbonácea. Para efluentes sujeitos a tratamento biológico, parte considerável da demanda de oxigênio pode se deve à nitrificação (conversão do nitrogênio amoniacal em nitrito e, em seguida, em nitrato).

DEMANDA TOTAL DE OXIGÊNIO

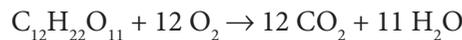
A demanda total de oxigênio (DTO) pode ser estimada por um equipamento chamado analisador de DTO (Ionics Model 225, por exemplo) em três minutos. Foi demonstrado que há uma nítida correlação entre DBO e DQO, e seu valor aproxima-se mais da demanda teórica de oxigênio (DTeO) do que no caso de métodos químicos.

CARBONO ORGÂNICO TOTAL

Os testes para estimativa do carbono orgânico total (COT) são baseados na oxidação do carbono existente na matéria orgânica, que resulta em dióxido de carbono (CO_2). A determinação do CO_2 é obtida por meio de absorção em hidróxido de potássio (KOH) ou análises instrumentais, como, por exemplo, a utilização de analisador de infravermelho.

CARBONO ORGÂNICO TEÓRICO

Pelo fato de a demanda teórica de oxigênio (DTeO) medir oxigênio (O_2) e o carbono orgânico teórico (COTe) medir carbono (C), a relação entre DTeO e COTe pode ser estimada rapidamente por meio da estequiometria da equação de oxidação da sacarose, por exemplo:



O peso molecular do carbono na sacarose é $12 \times 12 = 144$, ao passo que o peso molecular do oxigênio é $12 \times 2 \times 16 = 384$. A relação entre DTeO e COTe é $384/144 = 2,67$.

MODELO MATEMÁTICO PARA A CURVA DE DBO

A cinética das reações de DBO é, para finalidades práticas, formulada de acordo com reações cinéticas de primeira ordem. Pode ser expressa por:

$$\frac{dL_t}{dt} = -K_1 L_t \quad (1.10)$$

em que:

L_t : concentração de matéria orgânica remanescente na primeira fase no tempo t , mg/L;

dL/dt : taxa de redução de matéria orgânica pela oxidação biológica aeróbia;

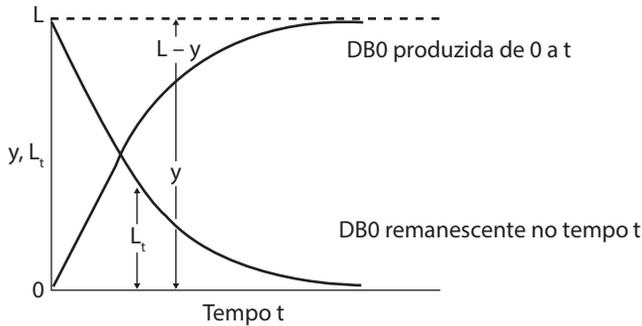
K_1 : taxa de remoção total, base e (neperiano), dia^{-1} ;

t : tempo de incubação, dia.

O sinal negativo da Equação 1.10 é necessário porque $dL_t/dt < 0$ e $L_t > 0$.

A DBO de primeira fase é aquela associada à oxidação bioquímica de material carbonáceo. No geral, a maior parte do material carbonáceo se oxida antes da segunda fase. A DBO da segunda fase é aquela associada à oxidação bioquímica de material nitrogenado. Como o término indica, a oxidação da matéria nitrogenada geralmente não começa até que uma porção da matéria carbonácea tenha sido oxidada durante a primeira fase (WEF, 1998).

A Figura 1.6 apresenta a curva de DBO em função do tempo.



Fonte: adaptada de Metcalf & Eddy, Inc. (1991).

Figura 1.6 – Curva de DBO da primeira fase

A Equação 1.10 pode ser escrita como:

$$\frac{dL_t}{L} = -K_1 dt \quad (1.11)$$

Integrando a Equação 1.11 entre zero e t , que corresponde à concentração inicial da matéria orgânica remanescente na primeira fase L , e o tempo t , que corresponde à concentração L_t , obtém-se a Equação 1.12.

$$\ln\left(\frac{L_t}{L}\right) = \ln e^{-K_1 t} \quad (1.12)$$

A Equação 1.12 pode ser transformada na Equação 1.13, que é a quantidade de DBO remanescente no tempo t .

$$L_t = L e^{-K_1 t} \quad (1.13)$$

No sistema decimal, a Equação 1.13 tem a forma da Equação 1.14.

$$L_t = L 10^{-K_1 t} \quad (1.14)$$

em que:

$$K \text{ (base 10)} = \frac{K_1 \text{ (base e)}}{2,303}$$

Seja Y a matéria orgânica oxidada até o tempo t ,

$$Y = L - L_t \quad (1.15)$$

Combinando as equações 1.13, 1.14 e 1.15, são obtidas, respectivamente, as equações do modelo matemático para curva de DBO nos sistemas neperiano e decimal, por meio das equações 1.16 e 1.17.

$$Y = L (1 - e^{-K_1 t}) \quad (1.16)$$

$$Y = L (1 - 10^{-Kt}) \quad (1.17)$$

Das equações 1.16 e 1.17, pode-se concluir que, para um longo período de oxidação, $t \rightarrow \infty$ e $Y = L$. Por isso, K_1 ou K e L medem, respectivamente, a taxa de estabilização bioquímica e a quantidade total de matéria orgânica presente no esgoto.

Para as águas poluídas e os resíduos de esgoto, um valor típico de K (base 10, 20 °C) é 0,10 dia⁻¹. Contudo, os valores de K variam significativamente com o tipo de esgoto. A faixa de variação está compreendida entre 0,05 dia⁻¹ e 0,30 dia⁻¹ ou mais. Para obter a DBO final, a quantidade de oxigênio varia com o tempo e com diferentes valores de K . Como a DBO é estimada a 20 °C, para determinar a constante K ou K_1 em outras temperaturas é usada a fórmula de Van't Hoff-Arrhenius (Equação 1.18).

$$K_T = K_{20^\circ\text{C}} \theta^{T-20} \quad (1.18)$$

em que:

K_T : coeficiente da temperatura desejada;

$K_{20^\circ\text{C}}$: coeficiente a 20 °C;

θ : coeficiente de respiração;

T : temperatura média anual (°C).

Os diversos valores do coeficiente de respiração, θ , estão apresentados na Tabela 1.7.

Tabela 1.7 – Coeficiente de respiração para atividades microbianas

Processo	Coeficiente de respiração (θ)
Lodos ativados	1,00 a 1,04
Filtros biológicos	1,035
Lagoas aeradas aeróbias	1,035
Lagoas aeradas facultativas	1,023 a 1,09
Lagoas aeradas do tipo aeração prolongada	1,01 a 1,03
Lagoas de estabilização	1,035

MÉTODOS USADOS PARA DETERMINAÇÃO DE K E L

O valor de K é necessário se a DBO for usada para obter L (DBO final ou $DBO_{20\text{dias}}$). O procedimento normal, adotado quando esses valores são desconhecidos, é a determinação de K e L por meio de uma série de análises de DBO.

Há vários métodos para determinar valores. Os principais são:

- método dos mínimos quadrados;
- método dos momentos;
- método da diferença diária;
- método da razão rápida;
- método de Thomas.

A seguir, são ilustrados os métodos mais usados: o método dos mínimos quadrados e o método de Thomas.

Método dos mínimos quadrados

As fórmulas utilizadas são estas:

$$n a + b \sum y - \sum \frac{dy}{dt} = 0 \quad (1.19)$$

$$a \sum y + b \sum y^2 - \sum y \frac{dy}{dt} = 0 \quad (1.20)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{Y_{n+1} - Y_{n-1}}{2\Delta t} \quad (1.21)$$

$$K_1 = -b \text{ (base e)} \quad (1.22)$$

$$L = -\frac{a}{b} \quad (1.23)$$

em que:

- n : número de dados;
- a : inclinação da reta;
- b : ordenada;
- y : DBO produzida no tempo t , mg/L;
- t : tempo de incubação, dia;
- K_1 : taxa de remoção total, base e, dia⁻¹;
- L : DBO final, mg/L.

Método de Thomas

O método de Thomas é baseado na similitude de duas séries de funções. É um procedimento gráfico, apresentado pela Figura 1.7, a seguir, em função da Equação 1.24.

$$\left(\frac{t}{Y}\right)^{1/3} = (2,3 KL)^{-1/3} + \frac{K^{2/3}}{3,43 L^{1/3}} t \quad (1.24)$$

em que:

Y : DBO produzida no tempo t , mg/L;

K : taxa de remoção total, base 10, dia⁻¹;

L : DBO final, mg/L.

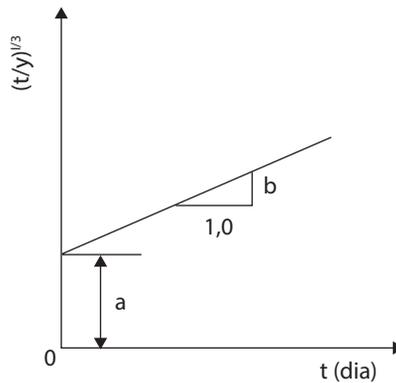


Figura 1.7 – Gráfico para estimativa de K e L , pelo método de Thomas

A Equação 1.24 tem a forma de uma reta, podendo ser traçada como uma função de t .

$$z = a + b t \quad (1.25)$$

em que:

$$z = \left(\frac{t}{Y}\right)^{1/3};$$

$$a = (2,3 KL)^{-1/3};$$

$$b = \frac{K^{2/3}}{3,43 L^{1/3}}.$$

A inclinação b e a ordenada a da reta que melhor se ajustam aos pontos dados podem ser usadas para o cálculo de K e L .

$$K = 2,61 \frac{b}{a} \quad (1.26)$$

$$L = \frac{1}{2,3 Ka^3} \quad (1.27)$$

Para usar esse método, várias observações de Y como função de t são necessárias. Os dados observados devem ser limitados aos primeiros dez dias por causa da interferência nitrogenada (segunda fase).

PRINCIPAIS FASES DO TRATAMENTO DOS ESGOTOS DOMÉSTICOS

O grau do tratamento e sua eficiência são função do corpo receptor, das características do uso da água a jusante do ponto de lançamento, da capacidade de autodepuração e diluição do corpo de água, da legislação ambiental e das consequências do lançamento das águas residuais. Há muitas alternativas para o tratamento de esgoto de uma cidade, com o emprego de processos biológicos ou mesmo físico-químicos. Entretanto, atualmente, quase todas as estações de tratamento de esgotos domésticos são concebidas com base em processos biológicos.

As principais fases do processo de tratamento dos esgotos domésticos são: tratamento preliminar, tratamento primário, tratamento secundário e tratamento terciário.

O tratamento preliminar envolve a remoção de sólidos suspensos grosseiros e sólidos suspensos fixos (principalmente areia). A remoção dos sólidos grosseiros é feita por meio de grades de barras, e a limpeza é manual ou mecanizada, com desintegradores, trituradores ou peneiras. Os sólidos suspensos fixos, de menores dimensões, como os detritos minerais pesados, são removidos por meio de desarenadores, também chamados caixas de areia. Essa fase de tratamento também tem o objetivo de medir a vazão de esgoto que entra na estação.

O tratamento primário tem por objeto a remoção dos sólidos sedimentáveis e de parte da matéria orgânica. Pode incluir a sedimentação ou a flotação de partículas suspensas.

O tratamento secundário destina-se à degradação biológica dos compostos carbonáceos. Quando é feita essa degradação, naturalmente ocorre a decomposição de carboidratos, proteínas e lipídios em compostos mais simples, como CO_2 , H_2O , NH_3 , CH_4 , H_2S etc., dependendo do tipo de processo predominante. As bactérias que realizam o tratamento, por sua vez, reproduzem-se e têm sua massa total aumentada em função da quantidade de matéria degradada, ou seja, com o tratamento, há diminuição da matéria orgânica e produção de lodo. Caso seja empregado o processo aeróbio, para cada quilo de DBO removida, há formação de 0,4 kg a 0,7 kg de lodo (matéria seca); caso a opção seja pelo processo anaeróbio, tem-se uma produção de 0,02 kg a 0,2 kg de lodo para cada quilo de DBO removida (CAMPOS, 1994).

De modo geral, a maioria das estações de tratamento construídas alcança apenas o nível de tratamento secundário, mas, em muitas situações, é obrigatório que esse tratamento alcance o nível denominado terciário. Isso é necessário porque o efluente do tratamento secundário ainda possui nitrogênio e fósforo em quantidade, concentração e forma que podem provocar problemas no corpo receptor, dando origem ao fenômeno denominado eutrofização, que é percebido pela intensa proliferação de algas.

O tratamento terciário, ou tratamento avançado, tem por objetivo, principalmente, a remoção de nutrientes (nitrogênio e fósforo), bem como a desinfecção e a remoção de compostos tóxicos e contaminantes específicos. Geralmente é utilizado quando se requer efluente final com elevado grau de polimento, com valores muito pequenos de DBO e SS.

No Quadro 1.4, são apresentados os diversos níveis de tratamento de esgoto. Na Figura 1.8, apresenta-se um fluxograma esquemático de um sistema completo de tratamento de águas residuais.

Quadro 1.4 – Níveis de tratamento dos esgotos domésticos

Nível	Remoção
Preliminar	Sólidos suspensos grosseiros e arena Sólidos suspensos sedimentáveis
Primário	DBO suspensa (matéria orgânica componente dos sólidos suspensos sedimentáveis)
Secundário	DBO suspensa (matéria orgânica suspensa fina, não removida no tratamento primário) DBO solúvel (matéria orgânica na forma de sólidos dissolvidos).
Terciário	Nutrientes Organismos patogênicos Compostos não biodegradáveis Metais pesados Sólidos inorgânicos dissolvidos Sólidos suspensos remanescentes

Fonte: Von Sperling (1995).

Estação convencional de tratamento de águas residuais é aquela que combina processos físicos e biológicos para remover a matéria orgânica (HAMMER; HAMMER JR., 1977). Filtros biológicos e sistemas de lodos ativados são exemplos de tratamento convencional de águas residuais domésticas.

O sistema de lodos ativados foi utilizado pela primeira vez há mais de cem anos. Constituiu uma verdadeira revolução tecnológica para o tratamento das águas residuais. Esse sistema está baseado no processo biológico aeróbio e fundamenta-se no princípio de que é preciso evitar a fuga descontrolada de bactérias ativas (lodo ativo)

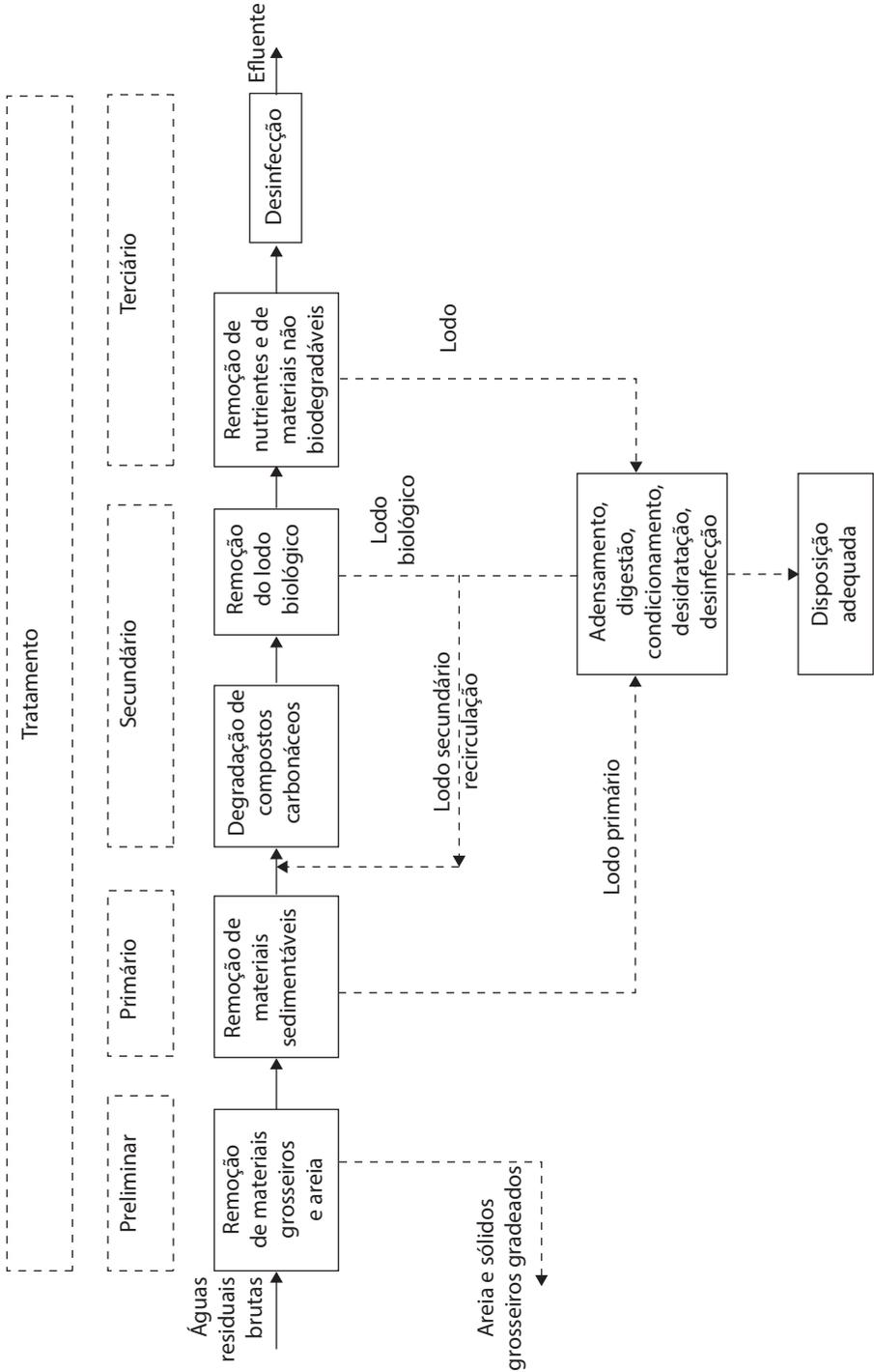


Figura 1.8 – Sistema de tratamento de águas residuais

Fonte: adaptada de Campos (1994).

produzidas no sistema. Para isso, deve-se fazer a recirculação dessa biomassa, de modo que se mantenha a maior concentração possível de micro-organismos ativos no tanque de aeração, a fim de acelerar a remoção da matéria orgânica das águas residuais (CAMPOS, 1994). Esses micro-organismos formam flocos que podem ser removidos por sedimentação em um decantador secundário (ou flotor por ar dissolvido). Parte do lodo é recirculado ao reator aeróbio e parte é descartada para tratamento. Esse sistema necessita de decantador primário e foi desenvolvido em 1913, na Inglaterra, por Ardern e Lockett (1914).

Entre os processos biológicos aeróbios, o sistema de lodos ativados é o mais utilizado no tratamento de esgotos domésticos, sendo essa alternativa empregada em mais de 90% das estações de médio e grande portes de países desenvolvidos (CAMPOS, 1994). Esse sistema apresenta várias vantagens, como elevada eficiência de remoção da DBO, flexibilidade operacional e possibilidade de remoção de nutrientes, mas apresenta alguns aspectos negativos, como elevado consumo de energia elétrica, custos altos de implantação e manutenção, operação sofisticada e grande produção de lodo.

Na Figura 1.9, é apresentado o esquema básico de um sistema de lodos ativados operado continuamente.

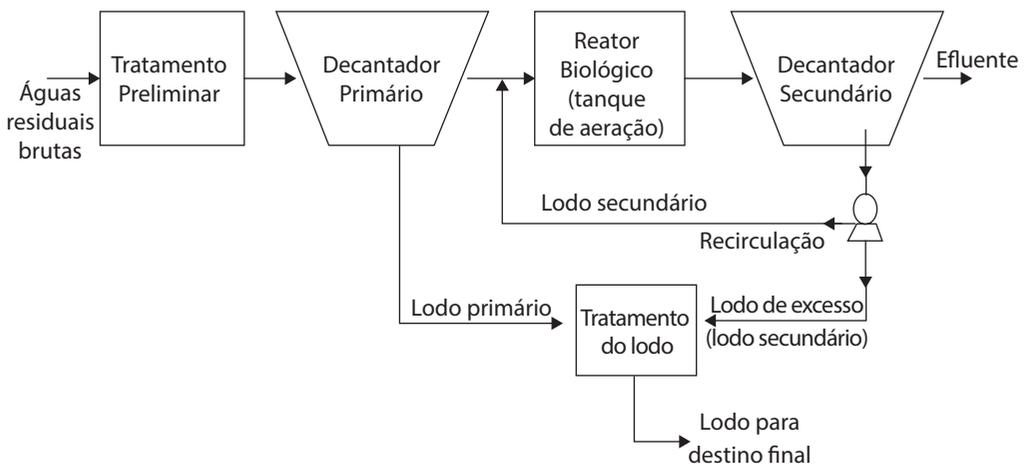


Figura 1.9 – Esquema do sistema de lodos ativados

O filtro biológico aeróbio consiste em um reator de fluxo descendente denominado leito fixo e biofilme imobilizado. Esse filtro faz que os micro-organismos sejam mantidos aderidos em um material de suporte que constitui o recheio da unidade. Basicamente, o filtro biológico aeróbio é um leito de pedras ou outros materiais inertes com forma, tamanho e interstícios adequados, que permite livre circulação do ar e sobre o qual dispositivos de distribuição (geralmente giratórios) lançam esgotos domésticos que percolam entre o material do recheio. Enquanto o líquido percola através do leito, ocorre o contato entre os substratos que são degradados e os organismos aderidos ao suporte. Nesse tipo de tratamento, é obrigatório o uso de

decantadores primário e secundário e, em certos casos, é promovida a recirculação do efluente do decantador secundário (CAMPOS, 1994).

Os filtros biológicos anaeróbios funcionam, em sua maioria, com leito submerso e fluxo ascendente, mas também podem ser usados com fluxo descendente. Quando em boas condições de funcionamento, esses filtros podem apresentar elevada eficiência de remoção de DQO e não exigem decantador secundário (CAMPOS, 1994).

O primeiro filtro biológico foi posto em operação na Inglaterra, em Lancashire, na estação de tratamento Salford (BOLTON; KLEIN, 1973 apud JORDÃO; PESSÔA, 1995).

A Figura 1.10 apresenta um filtro biológico aeróbio com recirculação do efluente.

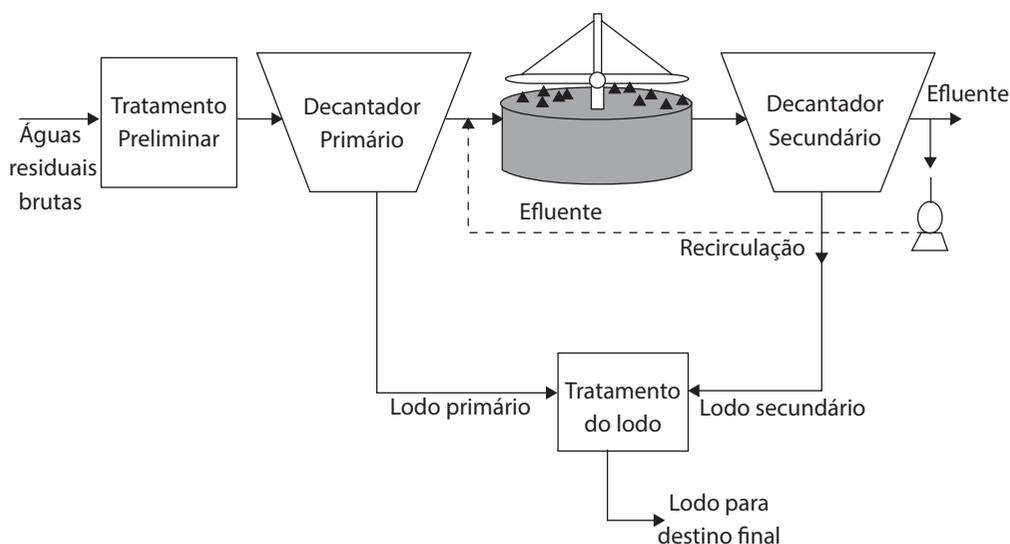


Figura 1.10 – Esquema de filtro biológico aeróbio com recirculação do efluente

Em países de clima tropical, em virtude das temperaturas médias muito mais elevadas que em países de clima temperado, os processos biológicos de tratamento de esgoto podem ser mais simples e econômicos porque os micro-organismos se desenvolvem com maior rapidez em climas quentes.

Atualmente, em países de clima tropical, os métodos de tratamento de esgoto mais usados são:

- lagoas de estabilização;
- lagoas aeradas mecanicamente;
- reator anaeróbio, geralmente reator *upflow anaerobic sludge blanket* (UASB);
- valos de oxidação tipo Pasveer;
- *wetlands*.

Esses processos, geralmente, são muito mais econômicos do que o sistema de lodos ativados ou filtros biológicos. Dos métodos de tratamento de esgoto utilizados nos países de clima tropical, as lagoas de estabilização são um dos processos mais econômicos e eficazes existentes atualmente. Estas lagoas ainda têm a principal vantagem de ser o processo mais eficiente para a redução de micro-organismos patogênicos.

No Capítulo 7, há detalhamento sobre lagoas de estabilização.

EXEMPLO 1.5

As vazões dos efluentes das indústrias de comida, refrigerante e engarrafamento de leite, listadas na Tabela 1.2, são misturadas para tratamento combinado. Qual é o valor da DBO, SS e DQO médios em mg/L? Deve-se estimar a população hidráulica equivalente e de DBO para a vazão combinada, considerando o consumo *per capita* igual a 200 L/hab.dia e a contribuição de DBO *per capita* igual a 45 g/hab.dia.

Solução:

Foi elaborada a tabela a seguir para facilitar os cálculos:

Indústria	Vazão	DBO ₅	SS	DQO	
	(m ³ /dia)	(kg/dia)	(kg/dia)	(mg/L)	(kg/dia)
Comida	79	21	5	420	33,2
Refrigerante	61	29	29	1.000	79,0
Engarrafamento de leite	48	11	6	420	33,2
TOTAL	188	61	40	–	145,4

- Comida:

carga orgânica de DQO = $420 \times 79 \times 10^{-3} \cong 33,2$ kg/dia

- Refrigerante:

carga orgânica de DQO = $1000 \times 79 \times 10^{-3} \cong 79,0$ kg/dia

- Engarrafamento de leite:

carga orgânica de DQO = $420 \times 79 \times 10^{-3} \cong 33,2$ kg/dia

- Concentração média de DBO = $(61 \times 10^3)/188 \cong 324$ mg/L
- Concentração média de SS = $(40 \times 10^3)/188 \cong 213$ mg/L
- Concentração média de DQO = $(145 \times 10^3)/188 \cong 773$ mg/L
- População hidráulica equivalente = $(188 \times 10^3)/200 \cong 940$ hab.
- População equivalente (DBO) = $(188 \times 324)/45 \cong 1.354$ hab.



EXEMPLO 1.6

As variações de vazão e DBO com relação ao tempo em uma ETE são apresentadas na Figura 1.11. Calcula-se a concentração de DBO média simples e a concentração de DBO média ponderada em função da vazão.

Solução:

Foi elaborada a tabela a seguir para iniciar os cálculos:

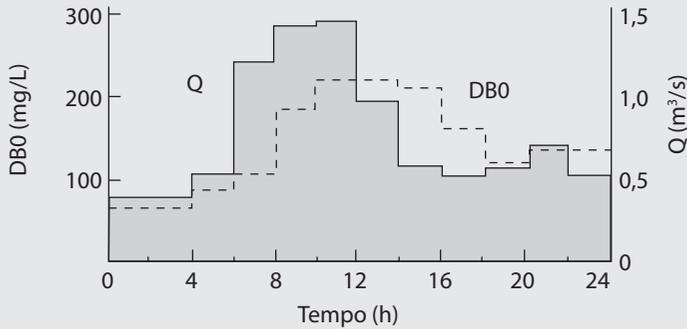
Tempo (horas)	n	DBO ₅ (mg/L)	Vazão (m ³ /s)	DBO × Vazão (mg/L) (m ³ /s)
0	1	70	0,40	28,00
2	2	70	0,40	28,00
4	3	85	0,55	46,75
6	4	105	1,20	126,00
8	5	178	1,40	249,20
10	6	220	1,42	312,40
12	7	220	0,95	209,00
14	8	208	0,58	120,64
16	9	160	0,52	83,20
18	10	115	0,56	64,40
20	11	135	0,70	94,50
22	12	135	0,51	68,85
TOTAL	12	1.701	9,19	1.430,94

- Concentração de DBO média simples:

$$DBO_{m\acute{e}dia} = \frac{\sum DBO}{n} = \frac{1.701}{12} \cong 142 \text{ mg/L}$$

- Concentração de DBO média ponderada em função da vazão:

$$DBO_{ponderada} = \frac{\sum (DBO \times vaz\tilde{a}o)}{\sum vaz\tilde{a}o} = \frac{1.430,94}{9,19} \cong 156 \text{ mg/L}$$



Fonte: adaptada de Metcalf & Eddy, Inc. (1991).

Figura 1.11 – Variação da vazão e DBO com relação ao tempo, em uma estação de tratamento de esgoto

EXEMPLO 1.7

A DBO_5 de um despejo líquido doméstico é 210 mg/L a 20 °C. Qual será a DBO final? Qual será a DBO para dez dias? Se a garrafa foi incubada a 30 °C, qual seria a DBO_5 ? Admitir $K_1 = 0,23 \text{ d}^{-1}$ e $\theta = 1,056$.

Solução:

- $DBO_{\text{última}}$: $Y_5 = L(1 - e^{-K_1 t}) \therefore$

$$L = \frac{Y_5}{1 - e^{-K_1 t}} = \frac{210}{1 - e^{-0,23 \times 5}} \cong 307 \text{ mg/L}$$

- DBO para dez dias:

$$Y_{10} = L(1 - e^{-K_1 t}) = 307(1 - e^{-0,23 \times 10}) \cong 276 \text{ mg/L}$$

- DBO_5 a 30 °C:

$$K_{1_{20C}} = K_{1_{20C}} \times 1,056^{30-20} = (0,23)(1,056)^{30-20} \cong 0,397 \text{ dia}^{-1}$$

$$DBO_{5_{30C}} = L(1 - e^{-K_1 t}) = (307)(1 - e^{-0,397 \times 5}) \cong 265 \text{ mg/L}$$

EXEMPLO 1.8

Os seguintes resultados de DBO foram obtidos em uma amostra de esgoto bruto a 20 °C. Calcula-se a constante de reação K e a DBO final da primeira fase usando o método dos mínimos quadrados e o método de Thomas.

t (dia)	Y (mg/L)
0	0
1	65
2	109
3	138
4	158
5	172
6	186

Solução:

a) Método dos mínimos quadrados:

Foi elaborada a tabela a seguir para iniciar os cálculos:

t	Y	Y^2	$\frac{dy}{dt}$	$Y \frac{dy}{dt}$
1	65	4.225	54,5	3.543
2	109	11.881	36,5	3.979
3	138	19.044	24,5	3.381
4	158	24.964	17,0	2.686
5	172	29.584	14,0	2.408
TOTAL	642	89.698	146,5	15.997

$$\frac{dy}{dt} = \frac{109 - 0}{2 \times 1} = 54,5$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{138 - 65}{2 \times 1} = 36,5$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{158 - 109}{2 \times 1} = 24,5$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{172 - 138}{2 \times 1} = 17,0$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{186 - 158}{2 \times 1} = 14,0$$

K e L são estimadas por meio das equações 1.19, 1.20, 1.22 e 1.23.

$$\begin{cases} 5a + 642b - 146,5 = 0 \\ 642 + 89698b - 15.997 = 0 \end{cases}$$

Desenvolvendo o sistema de equações apresentado, encontram-se:

$$b \cong -0,389$$

$$a \cong 79,2$$

$$K_1 = -b \therefore K_1 \cong 0,389 \text{ dia}^{-1}$$

$$K_1 = \frac{K_1}{2,303} = \frac{0,389}{2,303} \therefore K \cong 0,169 \text{ dia}^{-1}$$

$$L = -\frac{a}{b} = \frac{79,2}{0,389} \therefore L \cong 204 \text{ mg/L}$$

b) Método de Thomas:

Foi elaborada a tabela a seguir para determinação de K e L :

t (dia)	1	2	3	4	5	6
Y (mg/L)	65	109	138	158	172	186
$(t/Y)^{1/3}$	0,249	0,264	0,279	0,294	0,307	0,318

Com os dados obtidos, foi feito o gráfico de $(t/Y)^{1/3}$ versus t (Figura 1.12).

K e L são estimados por meio das equações 1.26 e 1.27.

$$K = 2,61 \frac{b}{a} = 2,61 \times \frac{0,0140}{0,2363} \therefore K \cong 0,154 \text{ dia}^{-1}$$

$$L = \frac{1}{2,3 Ka^3} = \frac{1}{2,3 \times 0,154 (0,2363)^3} \therefore L \cong 214 \text{ mg/L}$$

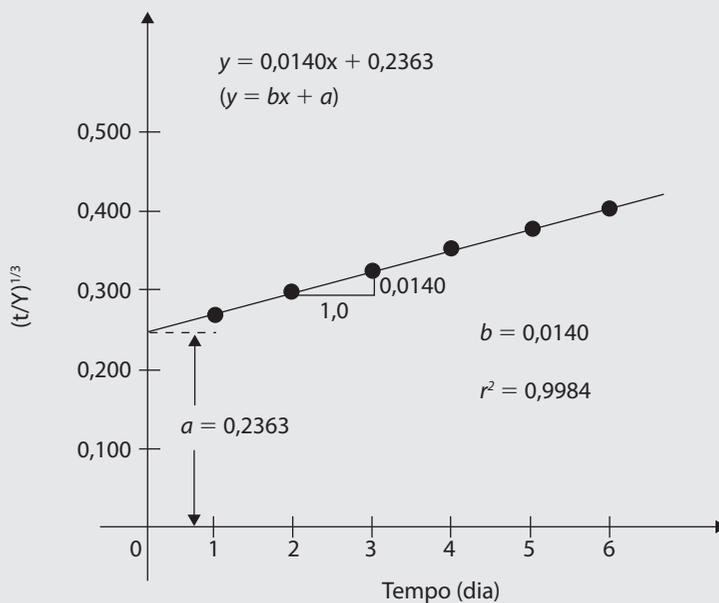


Figura 1.12 – Gráfico de $(t/Y)^{1/3}$ versus t

REFERÊNCIAS

- AFINI JR., B. DBO *per capita*, *Revista DAE*, v. 49, n. 156, p. 176-178, jul./set. 1989.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19. ed. Washington: American Public Health Association, 1995.
- ARCEIVALA, S. J. *Wastewater treatment and disposal: engineering and ecology in pollution control*, 15, Marcel Dekker, Inc. Nova York (1981).
- ARDERN, E.; LOCKETT, W. T. Experiments on the oxidation of sewage without the aid of filters. *J. Soc. Chem. Ind.*, v. 33, p. 523-1122, 1914.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) *NBR 9.649: projeto de redes coletoras de esgoto sanitários*. Rio de Janeiro, 1986.
- _____. *NBR 12.209: projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário*. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. *P-TB-145: projeto de terminologia brasileira: poluição das águas*. Rio de Janeiro, 1973.
- AZEVEDO NETTO, J. M. et al. *Redes de esgotos sanitários – curso por correspondência*. In: *Distribuição de população*. São Paulo: CETESB, 1984.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; ALVAREZ, G. A. *Manual de hidráulica*. 6. ed. São Paulo: Blucher, 1973. v. II.

- BARROS, R. T. V. et al. Saneamento. In: *Manual de saneamento e proteção ambiental para os municípios*. Belo Horizonte: DESA/UFGM, FEAM, 1995. v. 2.
- BRAGA, B. et al. *Introdução à engenharia ambiental*. São Paulo: Prentice Hall, São Paulo, 2002.
- BRASIL. Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF, 1981.
- BRASIL. Resolução CONAMA n. 357, de 18 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF, 2005.
- CAMPOS, J. R. *Alternativas para tratamento de esgotos: pré-tratamento de águas para abastecimento* (publicação n. 09). Americana: Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari, 1994.
- CARVALHO, B. *Glossário de saneamento e ecologia*. Rio de Janeiro: ABES, 1981.
- DALTRO FILHO, J. *Saneamento ambiental: doença, saúde e saneamento da água*. São Cristóvão: UFS/Fundação Oviêdo Teixeira, 2004.
- GRISI, B. M. *Glossário de ecologia e ciências ambientais*. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 1997.
- HAMMER, M. J. *Sistemas de abastecimento de água e esgotos*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.
- HAMMER, M. J.; HAMMER JR., M. J. *Water and wastewater technology*. 3. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1977.
- HANAI, F. Y. *Caracterização qualitativa e quantitativa de esgotos sanitários*. 1997. 235 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.
- JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. *Tratamento de Esgotos Domésticos*. 3. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995.
- MARA, D. D. *Sewage treatment in hot climates*. London: John Wiley & Sons, 1976.
- MARA, D. D.; CAIRNCROSS, S. *Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas en agricultura*. Genebra: Organização Mundial da Saúde, 1990.
- MENDONÇA, S. R. *Parâmetros básicos para elaboração de projetos de sistema de abastecimento de água*. João Pessoa: CAGEPA, 1977 (não publicado).
- _____. *Tópicos avançados em sistemas de esgotos sanitários*. Rio de Janeiro: ABES, 1987.
- MENDONÇA, S. R. et al. *Lagoas de estabilização e aeradas mecanicamente: novos conceitos*. João Pessoa: Edição do autor, 1990.
- METCALF & EDDY, INC. *Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*. 2. ed. New York: McGraw-Hill, Nova York, 1979.
- _____. *Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1991.
- _____. *Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

NEW YORK STATE DEPARTMENT OF HEALTH. *Manual of instruction for sewage treatment plant operators*. Albany: Health Education Service, s.d.

PÉREZ, C. R. *Desagues*. Bogotá: Escala, 1988.

RAMALHO, R. S. *Introduction to wastewater treatment processes*. 2. ed. New York: Academic Press, Inc., 1983.

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. *Diccionario da lengua española*. Madrid: Editorial Espasa Calpe, 1992. v. II.

SANTOS, L. L. S.; MENDONÇA, L. C. *Análise das interconexões de redes pluviais no sistema de esgotamento sanitário: estudo de caso do sistema Orlando Dantas, Aracaju-SE*. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 32., 2012, Salvador. *Anais...* Salvador: AIDIS/ABES, jun. 2012.

SNIS. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). *Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2013*. Brasília, DF, 2014. Disponível em: <www.snis.gov.br>. Acesso em: 12 de novembro de 2014.

TEBBUTT, T. H. *Principles of water quality control*. 2. ed. Oxford: Pergamon Press, 1977.

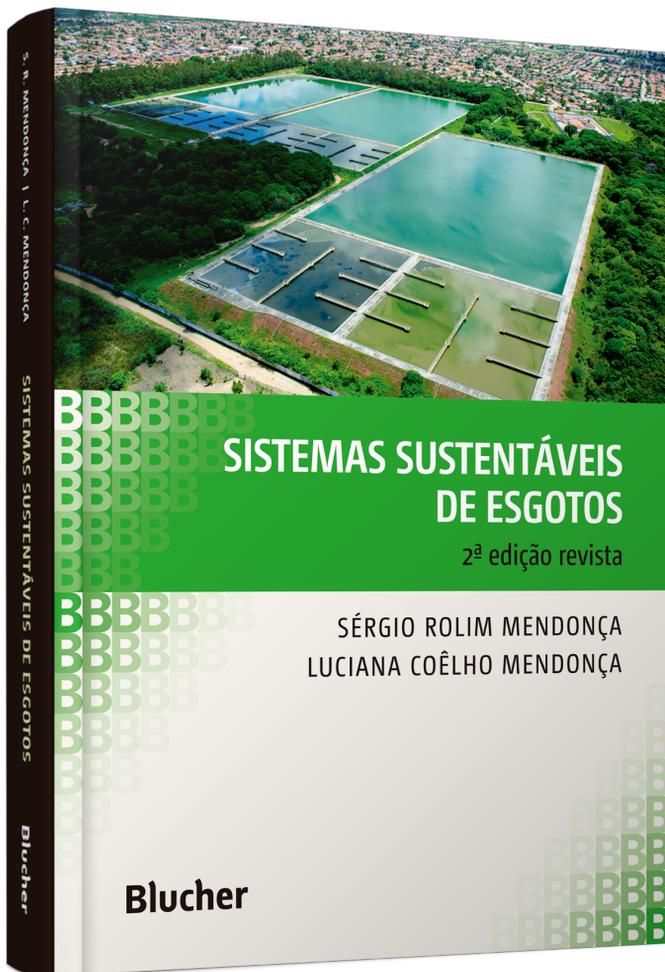
TORRES, P. *Desempenho de um reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) de bancada no tratamento de substrato sintético simulando esgotos sanitários*. 1989. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

TSUTIYA, M. T.; ALEM SOBRINHO, P. *Coleta e transporte de esgoto sanitário*. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.

VAN HAANDEL, A. C.; MARAIS, G. *O comportamento do sistema de lodo ativado: teoria e aplicações para projetos e operação*. Campina Grande: Efggraf, 1999.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. In: _____. *Princípios do tratamento biológico de águas residuais*. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1995. v. 1.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). *Glosario de ingeniería de aguas residuales: Español – Inglés*. S.l.: Water Environment Federation, 1998.



Clique aqui e:

[Veja na loja](#)

Sistemas Sustentáveis de Esgotos

Sérgio Rolim Mendonça
Luciana Coêlho Mendonça

ISBN: 9788521212546

Páginas: 364

Formato: 17 x 24 cm

Ano de Publicação: 2017