

AIRTON OENNING JUNIOR

**AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS AVANÇADAS PARA O REÚSO
DE ÁGUA EM INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA**

Dissertação apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Uivald Pawlowsky.

**CURITIBA
2006**



TERMO DE APROVAÇÃO

AIRTON OENNING JUNIOR

“AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS AVANÇADAS PARA O REÚSO DE ÁGUA EM INDÚSTRIA METAL- MECÂNICA ”.

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

PRESIDENTE:

Prof. Dr. Uivald Pawlowsky
Universidade Federal do Paraná
Orientador

MEMBROS:

Prof. Dr. Harry Alberto Bollmann
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Prof. Dr. Daniel Costa dos Santos
Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr. Moacir Kaminski
Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 14 de dezembro de 2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Oenning Junior, Airton.

Avaliação de tecnologias avançadas para o reúso de água em indústria metal-mecânica / Airton Oenning Junior. – Curitiba, 2006.

xxiv, 223f. : il.

Orientador: Uivald Pawlowsky.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Inclui Bibliografia.

1. Água - Reutilização. 2. Resíduos industriais. 3. Recursos hídricos - Desenvolvimento. I. Pawlowsky, Uivald. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 628.162

DEDICATÓRIA

A meus pais, *Airton (in memoriam)* e *Fraya*, por toda a dedicação para a minha formação e a minha esposa *Cassiana* pela compreensão nos momentos de ausência e pelo carinho recebido.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Urivald Pawlowsky pela orientação, pela confiança depositada e pelos valiosos ensinamentos.

Aos Professores convidados Harry Alberto Bollmann, Moacir Kaminski e Daniel Costa dos Santos pela atenção dispensada.

À Faurecia Assentos Automotivos, em nome do Sr. Ezequiel Serafim e Sra. Alexssandra Angelino, por possibilitar o desenvolvimento do estudo de caso apresentado.

As empresas Indústrias Químicas Carbomafra, White Martins, Buckman Laboratórios, GE Infrastructure Water & Process Technologies, Permution E. J. Krieger e Eka Chemicals, pelo uso de suas dependências, fornecimento de materiais, empréstimo de unidades piloto e patrocínio em geral.

Ao LABEAM, em especial a Professora Maria Cristina Borba Braga e Cristiane do Rocio Antunes pelo auxílio na metodologia e análises laboratoriais.

A empresa Inotec do Brasil Ltda., em nome do Sr. Jürg Walter Gertsch, por possibilitar minha dispensa neste último ano proporcionando maior dedicação à pesquisa.

Aos demais profissionais, colegas e amigos que, direta ou indiretamente contribuíram para a execução deste trabalho.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	vi
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE QUADROS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xx
RESUMO	xxiii
ABSTRACT	xxiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. CARACTERIZAÇÃO DO SETOR METAL-MECÂNICO	6
2.1.1. A importância do setor metal-mecânico	6
2.2. O REÚSO DA ÁGUA	9
2.2.1. Reúso planejado para fins potáveis	11
2.2.1.1. Reúso potável direto	11
2.2.1.1.1. Critérios para reúso potável direto	12
2.2.1.2. Reúso potável indireto	14
2.2.1.2.1. Critérios para reúso potável indireto	16
2.2.2. Reúso planejado para fins não potáveis	19
2.2.2.1. Reúso planejado de água para fins urbanos não potáveis	19
2.2.2.1.1. Critérios para reúso urbanos não potáveis	20
2.2.2.2. Reúso planejado de água para fins agrícolas	23
2.2.2.2.1. Critérios para reúso em atividades agrícolas	23
2.2.2.3. Reúso planejado de água para fins recreacionais	34
2.2.2.3.1. Critérios para reúso recreacional	35
2.2.2.4. Reúso planejado de água no meio ambiente	38
2.2.2.4.1. Critérios para reúso água no meio ambiente	38
2.2.2.5. Reúso planejado de água para fins industriais	39
2.2.2.5.1. Reúso macroexterno	40
2.2.2.5.2. Reúso específico	41
2.2.2.5.3. Problemas comuns na qualidade da água em sistemas de torres de resfriamento	41
2.2.2.5.4. Critérios para reúso industrial	43
2.2.2.6. Reúso planejado para recarga de aquífero subterrâneo	51
2.2.2.6.1. Critérios para reúso em recarga de aquíferos subterrâneos	52
2.2.2.7. Reúso de água para aquícultura	54
2.2.2.7.1. Critérios para reúso em aquícultura	55
2.3. TECNOLOGIAS USUAIS DE TRATAMENTO	57
2.3.1. Carvão Ativado	57
2.3.1.1. Fundamentos da Adsorção	59
2.3.1.2. Regeneração e reativação do carvão	61
2.3.1.3. Isotermas de adsorção	62
2.3.1.4. Aplicações para os tratamentos com carvão ativado	64
2.3.1.5. Tratamento com carvão ativado granulado CAG	64

2.3.1.6.	Tratamento com carvão ativado em pó CAP	66
2.3.2.	Oxidação Via Ozonização	67
2.3.2.1.	Aplicações	68
2.3.2.2.	Tecnologias disponíveis	70
2.3.2.3.	Sistema de tratamento com ozônio	71
2.3.2.4.	Dosagem	73
2.3.2.5.	Tratamento de efluentes.....	74
2.3.2.6.	Impactos ao meio ambiente	75
2.3.3.	Oxidação Via Dióxido de Cloro	76
2.3.3.1.	Aplicações	78
2.3.3.2.	Equipamento	79
2.3.3.3.	Dosagem	79
2.3.3.4.	Tratamento de efluentes.....	81
2.3.3.5.	Impactos ao meio ambiente	82
2.3.4.	Processo de Separação por Membranas – Osmose Reversa	82
2.3.4.1.	Classificação dos processos de separação por membranas.....	84
2.3.4.2.	Pré-tratamento da água de alimentação	86
2.3.4.3.	<i>Fouling</i>	87
2.3.4.4.	Aplicações	88
2.3.4.5.	Tratamento de efluentes.....	89
2.3.4.6.	Disposição do concentrado de efluentes e seus impactos	91
2.3.5.	Processo de Coagulação, Flocculação e Sedimentação	92
2.3.5.1.	Coagulação	93
2.3.5.2.	Polímeros	96
2.3.5.3.	Mistura e Flocculação	98
2.3.5.4.	Sedimentação.....	100
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	103
3.1.	MATERIAIS.....	103
3.1.1.	A indústria de assentos automotivos	103
3.1.1.1.	O processo de fabricação.....	104
3.1.1.2.	O processo de pintura e os efluentes gerados	106
3.1.1.3.	O Tratamento do efluente.....	109
3.1.1.4.	Potenciais áreas de reúso do efluente na planta industrial	110
3.1.1.5.	Critérios adotados para o reúso de água na indústria de assentos.....	112
3.1.2.	Água residuária.....	113
3.1.3.	Unidades experimentais	115
3.1.3.1.	Adsorção em carvão ativado	115
3.1.3.2.	Oxidação via ozonização.....	116
3.1.3.3.	Oxidação via dióxido de cloro.....	117
3.1.3.4.	Osmose reversa	119
3.1.3.5.	Coagulação – Flocculação	123
3.1.3.5.1	Auxiliares de Coagulação.....	125
3.1.4.	Equipamentos.....	126
3.2.	MÉTODOS.....	127
3.2.1.	Métodos para caracterização do efluente	127
3.2.1.1.	pH.....	128
3.2.1.2.	Turbidez	128
3.2.1.3.	Condutividade	128

3.2.1.4.	Cor.....	128
3.2.1.5.	DQO	129
3.2.1.6.	DBO ₅	129
3.2.1.7.	CT, COT, CI	130
3.2.1.8.	Sólidos totais	130
3.2.1.9.	Sólidos suspensos totais	130
3.2.1.10.	Sólidos dissolvidos totais.....	130
3.2.1.11.	Coliformes totais e fecais	131
3.2.2.	Metodologia empregada para as tecnologias	131
3.2.2.1.	Adsorção em Carvão Ativado	131
3.2.2.1.1	Determinação do tempo de contato.....	132
3.2.2.1.2	Determinação da taxa de adsorção.....	132
3.2.2.2.	Oxidação via ozonização.....	133
3.2.2.3.	Oxidação via dióxido de cloro.....	134
3.2.2.3.1	Determinação da demanda de dióxido de cloro	134
3.2.2.3.2	Determinação do CT _D	135
3.2.2.3.3	Ensaio com dióxido de cloro	135
3.2.2.4.	Osmose Reversa.....	135
3.2.2.4.1	Limpeza e determinação da vazão efetiva do sistema	136
3.2.2.4.2	Testes contínuos de osmose reversa.....	136
3.2.2.5.	Coagulação – Flocculação	136
3.2.2.5.1	Determinação da melhor faixa de pH e do tempo de sedimentação	137
3.2.2.5.2	Determinação da concentração dos coagulantes.....	137
3.2.2.5.3	Determinação da concentração dos auxiliares de coagulação.....	138
3.2.3.	Avaliação de custos diretos das tecnologias.....	139
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	141
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE.....	141
4.2.	COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS NO EFLUENTE.....	141
4.2.1.	Adsorção em carvão ativado.....	141
4.2.2.	Oxidação via ozonização	148
4.2.2.1.	Resultados preliminares	148
4.2.2.2.	Resultados dos testes	150
4.2.3.	Oxidação via dióxido de cloro	160
4.2.3.1.	Cálculo do CT _D	160
4.2.3.2.	Resultados dos testes	161
4.2.4.	Osmose reversa.....	164
4.2.5.	Coagulação–Flocculação	178
4.3.	AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DAS TECNOLOGIAS E DOS CRITÉRIOS DE REÚSO ADOTADOS.....	187
4.4.	AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DIRETOS DAS TECNOLOGIAS	194
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	204
5.1.	CONCLUSÕES.....	204
5.2.	RECOMENDAÇÕES	206
	REFERÊNCIAS.....	208
	ANEXO A – Resultados das análises físico-químicas para determinação da concentração ótima dos coagulantes.....	216

ANEXO B – Memorial de cálculo para dimensionamento do filtro e consumo de carvão ativado (situação real: remoção suficiente da DQO para reúso).	218
ANEXO C – Memorial de cálculo para dimensionamento do filtro e consumo de carvão ativado (situação ideal: remoção máxima de DQO).	219
ANEXO D – Levantamento de custos para tratamento com dióxido de cloro.	221
ANEXO E – Levantamento de custos da energia elétrica.	222

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – O EXEMPLO DE INSTALAÇÕES DE REÚSO, RECUPERAÇÃO E TRATAMENTO NO CICLO DA ÁGUA DENTRO DO CICLO HIDROLÓGICO.....	10
FIGURA 2.2 – MÉTODOS PARA RECARGA DE AQUÍFEROS SUBTERRÂNEOS.....	51
FIGURA 2.3 – SISTEMA DE TRATAMENTO SOLO-AQUÍFERO – SAT - SOIL-AQUIFER TREATMENT SYSTEMS	52
FIGURA 2.4 – ESBOÇO DA DEFINIÇÃO DE ADSORÇÃO DE CONSTITUINTES ORGÂNICOS EM CARVÃO ATIVADO	60
FIGURA 2.5 – DETALHE ESQUEMÁTICO DA GERAÇÃO DE OZÔNIO	72
FIGURA 2.6 – ESBOÇO DA DEFINIÇÃO DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS	83
FIGURA 2.7 – TIPOS DE <i>FOULING</i> EM MEMBRANAS CAUSADO POR ACÚMULO DE SÓLIDOS: (A) ESTREITAMENTO DO PORO, (B) ENTUPIAMENTO DO PORO, E (C) FORMAÇÃO DE GEL OU CAMADA DE REJEITO CAUSADA PELA POLARIZAÇÃO DE SÓLIDOS	88
FIGURA 2.8 – ESQUEMA PARA TRATAMENTO DE ÁGUA E EFLUENTES POR COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E DECANTAÇÃO: (A) PRÁTICA DOS EUA, (B) PRÁTICA DO REINO UNIDO	102
FIGURA 3.1 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PINTURA.....	108
FIGURA 3.2 – FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIO E INDUSTRIAL.	110
FIGURA 3.3 – APARELHO DE TESTES PARA MISTURA DO CARVÃO ATIVADO	116
FIGURA 3.4 – GERADOR DE OZÔNIO (E) E COLUNA DE CONTATO PARA OZONIZAÇÃO (D).....	117
FIGURA 3.5 – MEDIDOR DE OZÔNIO.....	117
FIGURA 3.6 – UNIDADE GERADORA DE DIÓXIDO DE CLORO SVP-PURE® MODELO AD.....	118
FIGURA 3.7 – FLUXOGRAMA DA UNIDADE GERADORA DE DIÓXIDO DE CLORO – SVP-PURE® MODELO AD	119
FIGURA 3.8 – APARELHO TIPO <i>JAR-TEST</i> USADO DURANTE OS ENSAIOS DE COM DIÓXIDO DE CLORO	121
FIGURA 3.9 – UNIDADE DE BANCADA DE OSMOSE REVERSA (D) PRECEDIDA POR TANQUE ALIMENTADOR E FILTRO DE POLIPROPILENO (E)	122
FIGURA 3.10 – FLUXOGRAMA DA UNIDADE DE BANCADA DE OSMOSE REVERSA.....	123
FIGURA 3.11 – APARELHO TIPO <i>JAR-TEST</i> USADO DURANTE OS ENSAIOS DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO EM BANCADA.....	126

FIGURA 3.12 – PROCEDIMENTO DE FILTRAGEM DO EFLUENTE PARA RETIRADA DO CARVÃO ATIVADO	132
FIGURA 4.1 – VARIAÇÃO DA DQO DURANTE A DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONTATO DO CARVÃO ATIVADO	143
FIGURA 4.2 – VARIAÇÃO DA COR DURANTE A DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONTATO DO CARVÃO ATIVADO.....	143
FIGURA 4.3 – VARIAÇÃO DO CT, COT, CI E TURBIDEZ DURANTE A DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONTATO DO CARVÃO ATIVADO	144
FIGURA 4.4 – VARIAÇÃO DO PH DURANTE A DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONTATO DO CARVÃO ATIVADO.....	145
FIGURA 4.5 – VARIAÇÃO DA DQO DURANTE A DETERMINAÇÃO DA TAXA DE ADSORÇÃO DO CARVÃO ATIVADO.....	146
FIGURA 4.6 – VARIAÇÃO DO CT, COT, CI E TURBIDEZ DURANTE A DETERMINAÇÃO DA TAXA DE ADSORÇÃO DO CARVÃO ATIVADO	147
FIGURA 4.7 – VARIAÇÃO DO PH DURANTE A DETERMINAÇÃO DA TAXA DE ADSORÇÃO DO CARVÃO ATIVADO.....	147
FIGURA 4.8 – CONSUMO ACUMULADO DE OZÔNIO EM RELAÇÃO AO TEMPO DO ENSAIO – TESTES 01 – AMOSTRA TRATADA	149
FIGURA 4.9 – CURVA DO CONSUMO ACUMULADO DE OZÔNIO EM RELAÇÃO AO TEMPO DO ENSAIO – TESTE 02 – AMOSTRA TRATADA E FILTRADA.....	150
FIGURA 4.10 – VARIAÇÃO DO PH DURANTE OS TESTES COM OZONIZAÇÃO	152
FIGURA 4.11 – VARIAÇÃO DE COLIFORMES TOTAIS DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO.....	152
FIGURA 4.12 – VARIAÇÃO DE COLIFORMES FECALIS DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO.....	153
FIGURA 4.13 – VARIAÇÃO DA DQO DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO	154
FIGURA 4.14 – VARIAÇÃO DA COR DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO	155
FIGURA 4.15 – VARIAÇÃO DO CARBONO TOTAL DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO	156
FIGURA 4.16 – VARIAÇÃO DO CARBONO ORGÂNICO DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO.....	156
FIGURA 4.17 – VARIAÇÃO DO CARBONO INORGÂNICO DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO.....	157
FIGURA 4.18 – VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO	158
FIGURA 4.19 – VARIAÇÃO DOS SÓLIDOS TOTAIS E DISSOLVIDOS DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO	159
FIGURA 4.20 – VARIAÇÃO DOS SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO	160

FIGURA 4.21 – PERFIS DO RESIDUAL DE DIÓXIDO DE CLORO PARA CONCENTRAÇÕES DE 5PPM DURANTE O TESTE DE DEMANDA – AMOSTRA TRATADA E TRATADA+FILTRADA.....	161
FIGURA 4.22 – VARIAÇÃO DO PH DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA ...	166
FIGURA 4.23 – VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA.....	166
FIGURA 4.24 – VARIAÇÃO DOS COLIFORMES TOTAIS DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA.....	167
FIGURA 4.25 – VARIAÇÃO DOS COLIFORMES FECAIS DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA.....	167
FIGURA 4.26 – VARIAÇÃO DA DQO DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA ...	170
FIGURA 4.27 – VARIAÇÃO DA COR DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA ...	170
FIGURA 4.28 – VARIAÇÃO DO CARBONO TOTAL DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA.....	171
FIGURA 4.29 – VARIAÇÃO DO CARBONO ORGÂNICO TOTAL DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA	171
FIGURA 4.30 – VARIAÇÃO DO CARBONO INORGÂNICO DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA	172
FIGURA 4.31 – VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA ...	175
FIGURA 4.32 – VARIAÇÃO DOS SÓLIDOS TOTAIS DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA.....	175
FIGURA 4.33 – VARIAÇÃO DOS SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA	176
FIGURA 4.34 – VARIAÇÃO DOS SÓLIDOS DISSOLVIDOS TOTAIS DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA	176
FIGURA 4.35 – PERFIS DE VAZÃO TOTAL, DO PERMEADO E DO REJEITO PARA OS TESTES COM AS DUAS MEMBRANAS DE OSMOSE REVERSA.....	178
FIGURA 4.36 – VARIAÇÃO DA DQO DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO.....	180
FIGURA 4.37 – VARIAÇÃO DA COR DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO.....	181
FIGURA 4.38 – VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO	181

FIGURA 4.39 – VARIAÇÃO DO CARBONO TOTAL DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO	182
FIGURA 4.40 – VARIAÇÃO DO CARBONO ORGÂNICO TOTAL DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO.	182
FIGURA 4.41 – VARIAÇÃO DO CARBONO INORGÂNICO DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO.	183
FIGURA 4.42 – VARIAÇÃO DO PH DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO.....	185
FIGURA 4.43 – VARIAÇÃO DOS SÓLIDOS TOTAIS DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO	185
FIGURA 4.44 – VARIAÇÃO DOS SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO.....	186
FIGURA 4.45 – VARIAÇÃO DOS SÓLIDOS DISSOLVIDOS TOTAIS DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO.....	186

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 – ESTATÍSTICA DAS INDÚSTRIAS METALÚRGICAS NAS CIDADES DA RMC	6
QUADRO 2.2 – ESTATÍSTICA DAS INDÚSTRIAS METALÚRGICAS POR SUBSETOR NA RMC	7
QUADRO 2.3 – ESTATÍSTICA DOS ASSOCIADOS AO SINDICADO POR EMPRESA NA RMC	7
QUADRO 2.4 – RESULTADOS FÍSICO-QUÍMICOS DAS AMOSTRAS DO ESTUDO PARA REÚSO POTÁVEL EM SAN DIEGO - US	13
QUADRO 2.5 – RESULTADOS PARA METAIS PESADOS E TRAÇOS ORGÂNICOS REFERENTE ÀS AMOSTRAS DO ESTUDO PARA REÚSO POTÁVEL EM SAN DIEGO - US.....	14
QUADRO 2.6 – CRITÉRIOS E DIRETIZES DA U.S. E.P.A. PARA REÚSO POTÁVEL INDIRETO	17
QUADRO 2.7 – CRITÉRIOS E DIRETIZES PARA REÚSO POTÁVEL INDIRETO ALGUNS ESTADOS AMERICANOS	19
QUADRO 2.8 – CRITÉRIOS E DIRETIZES DA U.S. E.P.A. PARA ÁGUA DE REÚSO URBANO NÃO POTÁVEL	20
QUADRO 2.9 – CRITÉRIOS, DIRETRIZES E TRATAMENTO DA ÁGUA RECUPERADA PARA REÚSO URBANO NÃO CONTROLADO EM ALGUNS ESTADOS AMERICANOS	22
QUADRO 2.10 – CRITÉRIOS, DIRETRIZES E TRATAMENTO DA ÁGUA RECUPERADA PARA REÚSO URBANO CONTROLADO EM ALGUNS ESTADOS AMERICANOS	22
QUADRO 2.11 – CRITÉRIOS DA OMS PARA A QUALIDADE MICROBIOLÓGIA E TRATAMENTO REQUERIDO PARA REÚSO DE EFLUENTE DOMÉSTICO	23
QUADRO 2.12 – CRITÉRIOS E DIRETIZES DA U.S. E.P.A. PARA ÁGUA DE REÚSO VISANDO ATIVIDADES AGRÍCOLAS	24
QUADRO 2.13 – CRITÉRIOS, DIRETRIZES E TRATAMENTO DA ÁGUA RECUPERADA PARA REÚSO NA AGRICULTURA EM ALGUNS ESTADOS AMERICANOS – CULTURAS COMESTÍVEIS	26
QUADRO 2.14 – CRITÉRIOS, DIRETRIZES E TRATAMENTO DA ÁGUA RECUPERADA PARA REÚSO NA AGRICULTURA EM ALGUNS ESTADOS AMERICANOS – CULTURAS NÃO COMESTÍVEIS.....	26
QUADRO 2.15 – PADRÕES PARA ÁGUA DE REÚSO NA IRRIGAÇÃO AGRÍCOLA NA TUNÍSIA.....	27
QUADRO 2.16 – MONITORAMENTO DO TRATAMENTO DE EFLUENTES (<i>E.COLI</i> NÚMEROS POR 100 ML DE EFLUENTE TRATADO) PARA DIVERSOS NÍVEIS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES NAS OPÇÕES A-G PARA USO NA AGRICULTURA	28
QUADRO 2.17 – PADRÃO ESTABELECIDO PELA W.H.O. PARA A ÁGUA DE REÚSO NA IRRIGAÇÃO AGRÍCOLA	28

QUADRO 2.18 – LIMITES ESTABELECIDOS PELA W.H.O. PARA OS NÍVEIS DE ELEMENTOS TRAÇO NA ÁGUA DE REÚSO UTILIZADA NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA	29
QUADRO 2.19 – TEORES MÁXIMOS PARA PARÂMETROS POTENCIALMENTE PREJUDICIAIS PARA ÁGUAS DE CLASSE 1, 2 E 3 DO CONAMA 357	32
QUADRO 2.20 – CRITÉRIOS E DIRETIZES DA U.S. E.P.A. PARA REÚSO RECREACIONAL.....	35
QUADRO 2.21 – CRITÉRIOS, DIRETRIZES E TRATAMENTO DA ÁGUA RECUPERADA PARA REÚSO RECREACIONAL EM ÁREAS NÃO CONTROLADAS EM ALGUNS ESTADOS AMERICANOS.....	36
QUADRO 2.22 – CRITÉRIOS, DIRETRIZES E TRATAMENTO DA ÁGUA RECUPERADA PARA REÚSO RECREACIONAL EM ÁREAS CONTROLADAS EM ALGUNS ESTADOS AMERICANOS.....	37
QUADRO 2.23 – PADRÕES DE QUALIDADE DE ÁGUAS PARA FIM RECREACIONAL.....	37
QUADRO 2.24 – CRITÉRIOS E DIRETIZES DA U.S. E.P.A. PARA REÚSO NO MEIO AMBIENTE.....	39
QUADRO 2.25 – CRITÉRIOS, DIRETRIZES E TRATAMENTO DA ÁGUA RECUPERADA PARA REÚSO NO MEIO AMBIENTE NOS ESTADOS DA FLÓRIDA E WASHINGTON - WETLANDS.....	39
QUADRO 2.26 – PRINCIPAIS APLICAÇÕES DE REÚSO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA.....	40
QUADRO 2.27 – CRITÉRIOS E DIRETIZES DA U.S. E.P.A. PARA ÁGUA DE REÚSO INDUSTRIAL	44
QUADRO 2.28 – CRITÉRIOS, DIRETRIZES E TRATAMENTO DA ÁGUA RECUPERADA PARA REÚSO INDUSTRIAL EM ALGUNS ESTADOS AMERICANOS.....	45
QUADRO 2.29 – CATEGORIAS DE ÁGUA DE ACORDO COM SUA QUALIDADE	45
QUADRO 2.30 – REQUISITOS PRECONIZADOS PELO DEPARTAMENTO DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DA FLÓRIDA E CALIFORNIA PARA QUALIDADE DA ÁGUA EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO.....	46
QUADRO 2.31 – REQUISITOS PARA QUALIDADE DA ÁGUA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS.....	46
QUADRO 2.32 – REQUISITOS PARA QUALIDADE DA ÁGUA PARA PROCESSOS INDUSTRIAIS ENVOLVENDO POLPA E PAPEL	47
QUADRO 2.33 – REQUISITOS DE QUALIDADE DA ÁGUA DE USO INDUSTRIAL. PARÂMETROS EM MG/L, EXCETO QUANDO ESPECIFICADA A UNIDADE	47
QUADRO 2.34 – CRITÉRIOS DE QUALIDADE REQUERIDA ANTES DA ADIÇÃO DE SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS PARA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DE AQUECEDORES E CALDEIRAS	49
QUADRO 2.35 – CRITÉRIOS DE QUALIDADE REQUERIDA PARA ÁGUA DE TORRE DE RESFRIAMENTO	50

QUADRO 2.36 – ESPECIFICAÇÕES DE QUALIDADE PARA ÁGUA DE MAKE UP DAS TORRES DE RESFRIAMENTO – POLO PETROQUÍMICO DE MAUÁ/SP	50
QUADRO 2.37 – CRITÉRIOS E DIRETIZES DA U.S. E.P.A. PARA RECARGA DE AQUÍFEROS	53
QUADRO 2.38 – CRITÉRIOS E DIRETIZES PARA RECARGA DE AQUÍFEROS EM ALGUNS ESTADOS AMERICANOS	53
QUADRO 2.39 – BASE CONCEITUAL PARA A PROPOSIÇÃO DOS CRITÉRIOS PARA RECARGA DE AQUÍFEROS SUBTERRÂNEOS NA CALIFÓRNIA ¹	54
QUADRO 2.40 – DIRETRIZES MICROBIOLÓGICAS ESTABELECIDAS PELA W.H.O. PARA O USO DE EFLUENTES E EXCREMENTOS EM AQUICULTURA	56
QUADRO 2.41 – PADRÕES PARA CORPOS DE ÁGUA ONDE HAJA PESCA OU CULTIVO DE ORGANISMOS PARA FINS DE CONSUMO INTENSIVO	57
QUADRO 2.42 – COMPARAÇÃO ENTRE CARVÃO ATIVADO GRANULAR E CARVÃO ATIVADO EM PÓ	58
QUADRO 2.43 – VALORES TÍPICOS DE PROJETO PARA REATORES COM CARVÃO ATIVADO GRANULAR	65
QUADRO 2.44 – ESPECIFICAÇÕES TÍPICAS PARA CARVÃO ATIVADO GRANULAR	66
QUADRO 2.45 – PROPRIEDADES DO OZÔNIO	67
QUADRO 2.46 – POTENCIAL DE OXIDAÇÃO DE VÁRIOS AGENTES OXIDANTES	68
QUADRO 2.47 – RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA E SOLUBILIDADE DO OZÔNIO EM ÁGUA	68
QUADRO 2.48 – EXEMPLOS DE TECNOLOGIAS UTILIZADAS PARA PRODUZIR O RADICAL LIVRE HIDROXILA REATIVO, OH ⁻	70
QUADRO 2.49 – NECESSIDADE ENERGÉTICA TÍPICA PARA APLICAÇÃO DE OZÔNIO	71
QUADRO 2.50 – DOSAGENS TÍPICAS NECESSÁRIAS PARA ATINGIR A DESINFECÇÃO DE COLIFORMES EM DIFERENTES DIRETRIZES PARA VÁRIOS EFLUENTES, BASEADO EM UM TEMPO DE CONTATO DE 15 MINUTOS	74
QUADRO 2.51 – RESULTADOS DE OZONIZAÇÃO DE EFLUENTE PROVINDO DE LODOS ATIVADOS DE BAIXA E ALTA TAXA, CLARIFICADO POR DECANTADOR SECUNDÁRIO	75
QUADRO 2.52 – VALORES DO FATOR CT _D (MG.MIN/L) DE ALGUNS DESINFETANTES PARA REMOÇÃO DE 99% DOS MICRORGANISMOS	80
QUADRO 2.53 – FAIXA ESTIMADA DO FATOR CT _D DO DIÓXIDO DE CLORO PARA VÁRIOS NÍVEIS DE INATIVAÇÃO DE BACTÉRIAS, VÍRUS E CISTOS DE PROTOZOÁRIOS EM EFLUENTE SECUNDÁRIO FILTRADO (PH ≈ 7 E T ≈ 20°C)	80

QUADRO 2.54 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS PROCESSOS DE MEMBRANAS.....	85
QUADRO 2.55 – CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DAS TECNOLOGIAS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS USADAS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES	86
QUADRO 2.56 – APLICAÇÕES TÍPICAS DAS TECNOLOGIAS DE MEMBRANA ..	89
QUADRO 2.57 – RESUMO DA PERFORMANCE DO USO DE MICROFILTRAÇÃO EM ESGOTO SANITÁRIO DA REGIÃO DE DUBLIN SAN RAMON COMO PRÉ-TRATAMENTO DE OSMOSE REVERSA ENTRE 04/2000 E 12/2000 ⁽¹⁾	90
QUADRO 2.58 – RESUMO DA PERFORMANCE DO USO DE OSMOSE REVERSA EM ESGOTO SANITÁRIO DA REGIÃO DE DUBLIN SAN RAMON ENTRE 04/1999 E 11/1999 ⁽¹⁾	91
QUADRO 2.59 – OPÇÕES PARA DISPOSIÇÃO DE CONCENTRADO DE ÁGUA SALGADA PROVINDO DE PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS	91
QUADRO 2.60 – PRODUTOS QUÍMICOS INORGÂNICOS MAIS USADOS PARA COAGULAÇÃO EM PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUA E EFLUENTES.....	95
QUADRO 2.61 – COAGULANTES E POLIELETRÓLITOS USADOS PARA O TRATAMENTO DE TURBIDEZ.....	98
QUADRO 2.62 – VALORES TÍPICOS PARA TEMPO DE DETENÇÃO E GRADIENTE G PARA MISTURA E FLOCULAÇÃO EM EFLUENTES	100
QUADRO 2.63 – CARACTERÍSTICAS DE SEDIMENTAÇÃO DE ALGUMAS PARTÍCULAS.....	102
QUADRO 3.1 – DEMANDA DE ÁGUA DE REÚSO POR APLICAÇÃO	111
QUADRO 3.2 – REQUISITOS FÍSICO-QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS MÍNIMOS NECESSÁRIOS PARA REUTILIZAÇÃO DE ÁGUA RECUPERADA	112
QUADRO 3.3 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DO EFLUENTE	114
QUADRO 3.4 – RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS COAGULANTES E POLIELETRÓLITOS USADOS NO <i>JAR-TEST</i>	125
QUADRO 3.5 – DADOS REFERENTE AO ENSAIO DE OZONIZAÇÃO	134
QUADRO 4.1 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DO EFLUENTE	141
QUADRO 4.2 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DO EFLUENTE TRATADO APÓS CONTATO COM CARVÃO ATIVADO DURANTE A DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONTATO EM BATELADA.....	142
QUADRO 4.3 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO APÓS CONTATO COM CARVÃO ATIVADO DURANTE A DETERMINAÇÃO DA TAXA DE ADSORÇÃO.....	145

QUADRO 4.4 – CONSUMO DE OZÔNIO PARA TESTE 01 – AMOSTRA TRATADA	149
QUADRO 4.5 – CONSUMO DE OZÔNIO PARA TESTE 02 – AMOSTRA TRATADA E FILTRADA.....	150
QUADRO 4.6 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DO EFLUENTE TRATADO E TRATADO + FILTRADO APÓS TRATAMENTO POR OZONIZAÇÃO.....	151
QUADRO 4.7 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO E TRATADO + FILTRADO APÓS TRATAMENTO POR OZONIZAÇÃO	154
QUADRO 4.8 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO E TRATADO + FILTRADO APÓS TRATAMENTO POR OZONIZAÇÃO	158
QUADRO 4.9 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DIÓXIDO DE CLORO DURANTE TESTE DE DEMANDA.....	161
QUADRO 4.10 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DO EFLUENTE TRATADO E TRATADO + FILTRADO APÓS APLICAÇÃO DE DIÓXIDO DE CLORO	162
QUADRO 4.11 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO E TRATADO + FILTRADO APÓS APLICAÇÃO DE DIÓXIDO DE CLORO	163
QUADRO 4.12 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO E TRATADO + FILTRADO APÓS APLICAÇÃO DE DIÓXIDO DE CLORO	164
QUADRO 4.13 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DO EFLUENTE FILTRADO TRATADO POR OSMOSE REVERSA	165
QUADRO 4.14 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE FILTRADO TRATADO POR OSMOSE REVERSA	169
QUADRO 4.15 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE FILTRADO TRATADO POR OSMOSE REVERSA	174
QUADRO 4.16 – VARIAÇÃO DA VAZÃO NOS TESTES REALIZADOS COM MEMBRANAS DE OSMOSE REVERSA	177
QUADRO 4.17 – RESULTADOS OBTIDOS DURANTE A DETERMINAÇÃO DO PH, DO TEMPO DE SEDIMENTAÇÃO E DA CONCENTRAÇÃO ÓTIMOS DOS COAGULANTES	178
QUADRO 4.18 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO POR COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO	179
QUADRO 4.19 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO POR COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO	184
QUADRO 4.20 – COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO AVANÇADO EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO DE REÚSO PARA ÁGUA DE PROCESSO	190

QUADRO 4.21 – COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO AVANÇADO EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO DE REÚSO PARA TORRES DE RESFRIAMENTO	191
QUADRO 4.22 – COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO AVANÇADO EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO DE REÚSO PARA LAVAGEM DE PISOS E IRRIGAÇÃO DE ÁREAS VERDES INDUSTRIAIS.....	192
QUADRO 4.23 – COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO AVANÇADO EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO DE REÚSO PARA DESCARGA SANITÁRIA.....	193
QUADRO 4.24 – PLANILHA DE CUSTOS PARA TRATAMENTO POR CARVÃO ATIVADO	195
QUADRO 4.25 – PLANILHA DE CUSTOS PARA TRATAMENTO POR OZONIZAÇÃO	197
QUADRO 4.26 – PLANILHA DE CUSTOS PARA TRATAMENTO POR DIÓXIDO DE CLORO	198
QUADRO 4.27 – PLANILHA DE CUSTOS PARA TRATAMENTO POR OSMOSE REVERSA	200
QUADRO 4.28 – PLANILHA DE CUSTOS PARA TRATAMENTO POR COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO	201
QUADRO 4.29 – COMPARATIVO MONETÁRIO POR METRO CÚBICO DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO AVANÇADO EM RELAÇÃO À SUA COMPOSIÇÃO DE CUSTOS	203
QUADRO A.1 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE NA DETERMINAÇÃO DA MELHOR CONCENTRAÇÃO DOS COAGULANTES	216
QUADRO A.2 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE NA DETERMINAÇÃO DA MELHOR CONCENTRAÇÃO DOS COAGULANTES	217
QUADRO C.1 – PLANILHA DE CUSTOS PARA TRATAMENTO POR CARVÃO ATIVADO CONSIDERANDO A REMOÇÃO MÁXIMA DE DQO	220
QUADRO D.1 – PLANILHA DE CUSTOS PARA TRATAMENTO POR DIÓXIDO DE CLORO – OPÇÃO DE TRATAMENTO COM PURATE® + ÁCIDO SULFÚRICO	221
QUADRO E.1 – LEVANTAMENTO DO CUSTO MÉDIO DA ENERGIA ELÉTRICA (KWH). VALORES EM REAIS (R\$)	222

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
AOG	- agentes organoclorados
ASTM	- American Society for Testing and Materials
AWWA	- American Water Works Association
CAG	- carvão ativado granulado
CAP	- carvão ativado em pó
CCA	- coluna de carvão ativado
CETESB	- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CF	- coliformes fecais
CI	- carbono inorgânico
CIC	- Cidade Industrial de Curitiba
ClO ₂	- dióxido de cloro
CIP	- cleaning in place
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	- carbono orgânico total
CPRG	- Chlorophenol red-β-D-galactopyranoside
CT	- carbono total
CT _D	- dosagem concentração x tempo para ClO ₂
CT _M	- coliformes totais
DBO ₅	- demanda bioquímica de oxigênio aos 5 dias
ddp	- diferença de potencial
DQO	- demanda química de oxigênio
EPA	- Environmental Protection Agency
F/M	- relação entre alimento e microrganismos do lodo ativado
FA	- filtro de areia

FCC	- filtro cartucho de carvão
FP	- filtro de polipropileno
HAA	- ácidos haloacéticos
IAP	- Instituto Ambiental do Paraná
LDM	- limite de detecção do método
MF	- microfiltração
MIB	- 2-methylisoborneol
MON	- matéria orgânica natural
MUG	- Methyl-umbelliferyl- β -D-glucuronide
NDMA	- <i>N</i> -nitrosodimethylamne
NF	- nanofiltração
NMP/100ml	- número mais provável de coliformes em 100mililitros
NTU	- unidade nefelométrica de turbidez
O ₂	- oxigênio
O ₃	- ozônio
OMS	- Organização Mundial de Saúde
ONPG	- Ortho-nitrophenyl- β -D-galactopyranoside
OR	- osmose reversa
POA	- processo oxidativo avançado
pH	- potencial hidrogeniônico
ppm	- partes por milhão
rpm	- rotações por minuto
RWC	- percentagem de contribuição da água recuperada na água potável de aquíferos subterrâneos
SANEPAR	- Companhia de Saneamento do Paraná
SAT	- soil aquifer treatment
SPM	- separação por membranas
SDT	- sólidos dissolvidos totais
SST	- sólidos suspensos totais

THM	- trihalometanos
TTS	- túnel de tratamento de superfície
UF	- ultrafiltração
UFC/mL	- unidade formadora de colônias por mililitro
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UFSC	- Universidade Federal de Santa Catarina
UV	- ultravioleta
WHO	- World Health Organization (Organização Mundial da Saúde)

RESUMO

A necessidade de minimizar o consumo de água potável e o descarte de efluentes tem se popularizado no meio industrial e sua aplicação vem crescendo com o passar dos anos influenciada por fatores como a efetivação da cobrança pela captação de água dos corpos hídricos e do descarte de efluentes, o custo ascendente da água potável e as exigências na legislação de emissão de efluentes e disposição no meio natural. Com o objetivo de reduzir o consumo de água e também do descarte do efluente tratado por lagoas de uma indústria metal-mecânica foi proposto a avaliação técnica e econômica de cinco tecnologias de tratamento avançadas que pudessem proporcionar a reutilização do efluente dentro da unidade fabril. Foram levantados quatro potenciais locais para reúso e sugeridos critérios e diretrizes para cada um deles mediante informações coletadas na indústria e na literatura. A primeira tecnologia testada foi a adsorção em carvão ativado de origem vegetal. A segunda e terceira tecnologias foram a oxidação do efluente por ozônio e dióxido de cloro, respectivamente. A quarta tecnologia testada foi a filtração por osmose reversa utilizando membrana de poliamida na configuração espiral enrolada e a quinta e última tecnologia tratou o efluente através do processo de coagulação/floculação com polieletrólitos sintéticos. Foi constatado que as tecnologias de adsorção com carvão ativado e filtração por osmose reversa apresentaram os melhores resultados e o efluente tratado por estes processos poderia ser reutilizado nos quatro locais para reúso propostos. Foi verificado também que as tecnologias oxidativas como o ozônio e o dióxido de cloro obtiveram apenas resultados satisfatórios na remoção de matéria orgânica, não viabilizando sua aplicação para reúso. No entanto, desinfetaram por completo o efluente. Para o tratamento com coagulação/floculação todos os parâmetros analisados atenderam a pelo menos dois locais de reúso, com exceção dos SDT. Por fim, baseado na capacidade de remoção de cada tratamento e com a vazão de projeto de $2,5\text{m}^3/\text{h}$ foram levantados os custos de tratamento de cada tecnologia. Em termos de custos foi confirmado o elevado valor do tratamento apresentado pela osmose reversa (US\$ $1,70/\text{m}^3$) e também pela coagulação/floculação (US\$ $1,57/\text{m}^3$), que superou o custo do tratamento com carvão ativado (US\$ $1,14/\text{m}^3$). Os processos oxidativos com ozônio (US\$ $0,54/\text{m}^3$) e dióxido de cloro (US\$ $0,71/\text{m}^3$) obtiveram os menores custos de tratamento por terem obtido baixo custo operacional. Também pode ser constatado que, para a configuração das estações apresentadas no estudo, o item de maior relevância na composição de custos para todas as tecnologias foi o custo de operação e insumos. Esta situação, de certa forma justificou o elevado custo do tratamento por coagulação/floculação apresentado.

ABSTRACT

The need to minimize the drinking water consumption and the discharge of effluents has been practised by industry and its application is increasing throughout the years influenced by factors such as taxation over water use from rivers as well as the discharge of effluents, the increasing cost of drinking water and the requirements of effluent emission legislation. With the objective to reduce the water consumption and the discharge of effluents treated in aerated lagoons in a metal industry, a technical and economical evaluation of five advanced treatment technologies was proposed in order to reuse the effluents in the manufacturing plant. Four potential sites for water reuse were chosen and for each of them criteria and requirements were suggested from information collected in the field and literature. The first technology tested was the adsorption with activated carbon from vegetal source. The second and third technologies were the oxidation with ozone and chlorine dioxide. The fourth tested technology was the filtration with reverse osmosis using polyamide membrane in spiral configuration and the fifth and last technology treated the effluent through coagulation/flocculation with synthetic polymers. The technologies of adsorption with activated carbon and reverse osmosis presented the best results and the effluent treated by these processes could be reused at the four places considered. The oxidation technologies with ozone and chlorine dioxide gave only satisfactory results in the removal of organic matter, not allowing its application for reuse. However, the effluent was completely disinfected. For the treatment with coagulation/flocculation, all the analyzed parameters were successful at least in two reuse places, with exception of the TDS. Finally, based on the removal capacity of each treatment and with the flowrate projected of $2,5\text{m}^3/\text{h}$, the costs of treatment of each technology were estimated. In terms of costs it was confirmed the high value of the reverse osmosis (US\$ $1,70/\text{m}^3$) and also the coagulation/flocculation (US\$ $1,57/\text{m}^3$), which surpassed the cost of the treatment with activated carbon (US\$ $1,14/\text{m}^3$). The oxidatives processes with ozone (US\$ $0,54/\text{m}^3$) and chlorine dioxide (US\$ $0,71/\text{m}^3$) presented the lowest treatment costs for having low operational cost. It can also be evidenced that, for the configuration of the study, the item with the largest relevance in the composition of costs for all the technologies was the cost of operation. This situation somehow justified the high cost of the treatment by coagulation/flocculation.

1. INTRODUÇÃO

A água, embora seja a substância mais difundida na terra, sua parte potável constitui apenas 2,59% da quantidade total no planeta, ficando oceanos com 97,41%. Deste pequeno percentual potável, 0,14% está concentrado na atmosfera, nas águas superficiais e como umidade no solo, sendo o restante encontrado em águas subterrâneas e camadas de gelos e glaciais (LORA, 2002). O homem tem utilizado, em suas atividades, aproximadamente 2,5 vezes mais água do que a quantidade disponível em todos os rios do planeta, o que tem obrigado a crescente utilização da água existente nos lagos e lençóis subterrâneos. A distribuição de água no planeta não é uniforme, o que produz alterações continentais, regionais e locais no uso dos recursos hídricos, com profundas implicações econômicas.

O Brasil, durante praticamente toda sua existência, não sofreu com a disponibilidade de água, devido ao fato de ser um país de proporções continentais, estando localizado no continente que possui o maior volume hídrico do planeta. Com isso, detém a maior reserva de água doce de superfície do planeta: 11%. Esta situação privilegiada, de certa forma, influenciou durante muitas décadas o comportamento ambiental de toda a sua população e mais precisamente a atuação das indústrias, quanto ao consumo desordenado e o desperdício alarmante de água.

A idéia do lançamento desordenado dos despejos industriais ou ainda da diluição dos mesmos para posterior lançamento no meio ambiente, aliada à falta de conhecimento específico de gerenciamento e tratamento destes efluentes, relaxava a atenção ambiental à quase total despreocupação com relação aos recursos naturais, ao homem, fauna e flora.

O esgotamento das águas de fontes subterrâneas e a poluição de rios e lagos fazem com que muitas regiões padeçam por falta de água. Esta situação continua se agravando, chegando-se a dizer que provavelmente a água potável poderá a ser a causa de conflitos bélicos no planeta (LORA, 2002). Pesquisas prevêem que no ano de 2025, 40% da população sofrerá de falta de água na Terra como consequência da contaminação de rios e mares, do desperdício e da má administração de recursos naturais (U.N., 2002).

No entanto, este comportamento precisou mudar nos últimos anos, pois o ritmo acelerado da industrialização somado ao descaso com que eram tratados os efluentes, bem como a concentração de contingentes populacionais em áreas urbanas, passaram a provocar profundos impactos no meio ambiente e agravaram sobremaneira a condição de sustentabilidade dos recursos hídricos dos centros urbanos e regiões de entorno.

Outro fator importante é a conscientização ambiental presente nos dias atuais em todos os setores da economia mundial. Com isso a eficiência de uma empresa está sendo diretamente relacionada à sua eficiência tecnológica, diante de um mercado consumidor cada vez mais consciente quanto às questões ambientais e de um mercado cada vez mais restritivo à empresas inadequadas a essa filosofia ambiental.

Além da pressão da sociedade, a indústria e seus gestores sentem que os despejos industriais significam em última análise perdas de insumo e energia, que os recursos naturais são limitados e que ao se prosseguir usando-os na mesma intensidade, a sobrevivência do planeta Terra e dos seus ocupantes torna-se ameaçada, no médio prazo. Surge a necessidade de se rever processos visando minimizar o consumo e o desperdício, evitando assim as perdas e diminuindo o volume de despejo a ser tratado e posteriormente lançado nos corpos hídricos.

Sendo assim, muda-se o enfoque, que antes era voltado para o tratamento dos efluentes gerados, passando a se encontrar meios de reduzir a geração destes, evitando desperdícios, através da reavaliação dos procedimentos internos de fabricação, buscando tecnologias mais modernas para atingir padrões de qualidade mais competitivos. Isto força as indústrias a desenvolverem uma produção racionalizada, mais limpa e a possibilidade de beneficiar o meio ambiente.

Contudo, com a incessante preocupação com a disponibilidade de água, há o avanço das legislações estaduais e federais, como a Lei 9.433/97, instituindo a cobrança, tanto para captação de água como para lançamento dos efluentes tratados e a Portaria nº. 54 do Ministério do Meio Ambiente que estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso. Neste momento a indústria se vê obrigada a rever seus processos e enxergar o reúso de água não só

como um fator de diferencial tecnológico, mas como possibilidade real em termos de economia monetária para seu processo e conseqüentemente seus produtos.

Neste contexto se encontra a indústria metal-mecânica do país e mais especificamente da Região Metropolitana de Curitiba. Um setor que é a base para a maioria dos outros setores industriais, sendo primordial ao automotivo, de transporte e elétrico.

O setor metal-mecânico na RMC atualmente possui mais de 3674 indústrias, segundo o Sindicato dos Metalúrgicos da Grande Curitiba, gerando 22.284 empregos diretos. Estes números comprovam o vulto do setor e a importância em estudar estas empresas que possuem alta capacidade poluidora, produzindo efluentes contendo elevado teor de DQO, óleos e graxas, muitas vezes emulsionados, pigmentos e traços de metais pesados (PAWLOWSKY, 2004).

Estudos de racionalização da água em um setor tão abrangente como o metal-mecânico são fundamentais para a criação de desdobramentos semelhante em empresas que estão ligadas a este setor, podendo ser seus fornecedores ou clientes.

Uma das abordagens para minimizar o volume de captação de água potável e o descarte de efluentes é o reúso da água dentro da unidade industrial. Tal prática tem se popularizado e sua aplicação vem crescendo com o passar dos anos influenciada por fatores como a efetivação da cobrança pelo uso e descarte de água e efluentes, o custo ascendente da água potável, a baixa disponibilidade regional e as exigências crescentes na legislação de emissão de efluentes e disposição no meio natural.

No caso de efluentes de indústria metal-mecânica contendo alta carga poluidora, o reúso da água sem tratamento específico pode ser inviável. Torna-se, então, imprescindível a aplicação de técnicas mais avançadas para o tratamento deste tipo de água residuária.

Com a remoção destes poluentes, abre-se a possibilidade de reutilização do efluente no processo industrial ou em usos menos exigentes da planta.

Para se alcançar os parâmetros de qualidade para reúso, faz-se necessário o tratamento do efluente com sistemas avançados, podendo ser físicos, químicos e eventualmente biológicos. Tratamentos como a adsorção em carvão ativado,;

oxidação com ozônio, dióxido de cloro e peróxido de hidrogênio, separação por membranas, eletrólise reversa, troca iônica, destilação e precipitação química são o estado da arte no que se refere ao tratamento da águas residuárias para reúso (MIERZWA, 2005 e METCALF & EDDY, 2003).

A escolha de uma ou a combinação entre duas ou mais técnicas, sempre dependerá do potencial de cada técnica e dos mecanismos envolvidos na redução do contaminante de interesse (MIERZWA 2005).

Mediante toda a problemática que envolve a água potável, as águas residuárias e a evolução de seus tratamentos já levantados anteriormente, pode-se afirmar de uma forma consciente que este trabalho possui justificativa sob três principais aspectos, sendo eles: (1) o tratamento avançado como ferramenta de viabilização do reúso de efluentes tendo como consequência a mitigação da poluição e proporcionando o aumento da oferta e otimização do uso dos recursos hídricos, (2) a perspectiva de falta mundial de água para abastecimento até o ano de 2025, segundo projeções de vários pesquisadores, organizações e institutos como a ONU e o ITT¹, e (3) da importância do setor metal-mecânico como indústria de base para outras áreas, podendo este influenciar seus setores correlatos.

O trabalho também contribuirá no sentido de fazer uma avaliação das tecnologias mais adequadas para tratar um efluente com a predominância de cor, óleos e graxas e viabilizar seu reúso na unidade fabril. Com base nos resultados obtidos, poder-se-á levantar procedimentos ótimos de trabalho com cada processo de tratamento, indicar a tecnologia adequada que corresponda às exigências da qualidade da água de reúso de cada setor e ainda servir como referência de consulta para outras indústrias do setor que desejarem implantar programas de reúso em suas unidades.

Com o intuito de reduzir o consumo de água e também do descarte do efluente tratado por lagoas de uma indústria metal-mecânica, este trabalho tem por objetivo testar cinco tecnologias avançadas com o propósito de melhorar a qualidade do efluente fabril, definir qual tecnologia fornecerá qualidade suficiente para

¹ ITT Industries. Guide to Global Water Issues. 1999. Disponível em: <http://www.itt.com/waterbook>. Acesso em 30/09/2005.

proporcionar o reúso deste efluente e também onde o efluente de cada tecnologia testada pode ser aplicado no processo fabril ou usos menos restritivos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica apresenta inicialmente uma breve caracterização do setor metal-mecânico e, a seguir, são abordadas a definição, a classificação e as diretrizes para o reúso de água. Por fim são abordados os equipamentos e processos que fazem parte das tecnologias avançadas que serão utilizadas neste estudo.

2.1. CARACTERIZAÇÃO DO SETOR METAL-MECÂNICO

Neste capítulo é feita uma caracterização do setor metal-mecânico da Região Metropolitana de Curitiba, considerado o mais importante por se tratar de indústrias que servem de base para a maioria dos outros setores e também por seu vulto em termos de quantidade de indústrias, empregabilidade e potencial poluidor.

2.1.1. A importância do setor metal-mecânico

A quantidade de indústrias que compõe o setor metal-mecânico da Região Metropolitana de Curitiba – RMC é considerado muito grande em comparação ao restante dos setores industriais da região. Segundo o Sindicato dos Metalúrgicos da Grande Curitiba, o total de indústrias cadastradas em seu banco de dados em agosto de 2005 chegava a 3674, mostrando o potencial do setor em termos de quantidade e criação/geração de empregos. O Quadro 2.1 mostra a distribuição das empresas nos municípios da RMC e o Quadro 2.2 mostra a quantidade de indústrias divididas em seus subsetores.

QUADRO 2.1 – ESTATÍSTICA DAS INDÚSTRIAS METALÚRGICAS NAS CIDADES DA RMC (continua)

Cidade	Total de empresas	Percentual (%)
CURITIBA	2282	62,11
SAO JOSE DOS PINHAIS	421	11,46
PINHAIS	325	8,85
COLOMBO	194	5,28
ARAUCARIA	127	3,46
CAMPO LARGO	103	2,80
ALMIRANTE TAMANDARÉ	44	1,20
FAZENDA RIO GRANDE	37	1,01
RIO NEGRO	24	0,65
PIRAQUARA	22	0,60

QUADRO 2.1 – ESTATÍSTICA DAS INDÚSTRIAS METALÚRGICAS NAS CIDADES DA RMC (conclusão)

Cidade	Total de empresas	Percentual (%)
LAPA	19	0,52
MANDIRITUBA	19	0,52
CAMPINA GRANDE DO SUL	16	0,44
RIO BRANCO DO SUL	12	0,33
QUATRO BARRAS	11	0,30
CONTENDA	10	0,27
SAO MATEUS DO SUL	2	0,05
AGUDOS DO SUL	2	0,05
BALSA NOVA	1	0,03
FAXINAL	1	0,03
PIEN	1	0,03
BOCAIUVA DO SUL	1	0,03
TOTAL	3674	100,00

FONTE: Sindicato dos Metalúrgicos da Grande Curitiba - SIMEC (2005)

QUADRO 2.2 – ESTATÍSTICA DAS INDÚSTRIAS METALÚRGICAS POR SUBSETOR NA RMC

Setor	Total de empresas	Percentual (%)
METALURGIA	3590	97,71
MAQUINAS	62	1,69
PIC – PARQUE INDUSTRIAL DE CURITIBA ¹	10	0,27
MONTADORAS	8	0,22
PEÇAS	3	0,08
REPARAÇÃO	1	0,03
TOTAL	3674	100,00

FONTE: Sindicato dos Metalúrgicos da Grande Curitiba - SIMEC (2005)

¹ Parte das empresas fornecedoras de produtos e serviços para as montadoras.

O Quadro 2.3 apresenta a quantidade de associados ao sindicato, refletindo o grande potencial empregador do setor. Fazendo uma análise mais apurada dos números percebe-se que, com a conscientização deste grande volume de funcionários para as práticas da racionalização e do reúso da água, os resultados práticos em termos de educação ambiental e economia de água seguramente seriam animadores em um futuro próximo.

QUADRO 2.3 – ESTATÍSTICA DOS ASSOCIADOS AO SINDICADO POR EMPRESA NA RMC (continua)

Empresa	Total de associados	Percentual (%)
ROBERT BOSCH LTDA	4.278	19,20
VOLKSWAGEN DO BRASIL LTDA.	2.189	9,82
CNH LATIN AMERICA LTDA	1.052	4,72
RENAULT DO BRASIL S/A	962	4,32
FAURECIA BANCOS PARA AUTOMÓVEIS ¹	676	3,03
VOLVO DO BRASIL VEICULOS LTDA	603	2,71
WHB COMP. AUTOMOTIVOS S/A	527	2,36
GL - EL. ELETRONICOS LORENZETTI.	493	2,21

QUADRO 2.3 – ESTATÍSTICA DOS ASSOCIADOS AO SINDICADO POR EMPRESA NA RMC (conclusão)

Empresa	Total de associados	Percentual (%)
KROMBERG E SCHUBERT DO BRASIL	353	1,58
METAPAR USINAGEM LTDA	340	1,53
TMT-MOTOCO DO BRASIL LTDA	260	1,17
AAM DO BRASIL LTDA	196	0,88
MAGIUS METALURGICA INDL. LTDA.	194	0,87
BRASISAT HARALD S.A-FILIAL	193	0,87
HUBNER IND. MEC. LTDA - MATRIZ	181	0,81
IBRATEC IND.BRAS. ARTEF. TEC.LTDA	177	0,79
PEGUFORM DO BRASIL	161	0,72
COMPANHIA SIDERURGICA NACIONAL	151	0,68
TROX DO BRASIL LTDA	150	0,67
HAAS DO BRASIL IND.MAQS. LTDA	148	0,66
DELPHI AUTOMOTIVE S.BRASIL LTDA	145	0,65
MONTANA IND.MAQS. LTDA	145	0,65
IND.COM. MAQ. PERFECTA CTBA LTDA	143	0,64
METALURGICA METAL TYPO LTDA.	134	0,60
SUZUKI IND.COM. MAQ. LTDA	132	0,59
TRUTZSCHLER IND.COM. MAQ. LTDA	131	0,59
GREIF HOLDING LTDA	126	0,57
FCM FABRICA MANCAIS CTBA. LTDA	125	0,56
PK CABLES DO BRASIL IND. E COM.	120	0,54
NILKO METALURGIA LTDA	114	0,51
SIND. DOS MET. DA GDE. CURITIBA	102	0,46
METALGRAFICA TRIVISAN S.A	99	0,44
SAS.AUTOMOTIVE DO BRASIL	97	0,44
BRAFER CONST. METAL. S/A.	97	0,44
KVAERNER DO BRASIL LTDA	94	0,42
LEOGAP IND. E COM. DE MAQUINAS LTDA.	92	0,41
FURUKAWA INDL. S/A-PRODUTOS ELETR.	85	0,38
LUMICENTER IND.COM. LUM. LTDA	82	0,37
VENTRABRAS METALURGICA LTDA	78	0,35
GESTAMP PARANA S/A (THERA)	74	0,33
GUANAVI LOGISTICA LTDA	72	0,32
UDO HEUER S/A INDÚSTRIA COMERCIO	70	0,31
CONDUSPAR CONDUTORES ELET. LTDA	70	0,31
MACLINEA S/A-MAQS. ENG. P/MADEIRAS	67	0,30
SECCIONAL BRASIL S/A	66	0,30
MOLINS DO BRASIL MAQ. AUT. LTDA.	65	0,29
MOLLER INDÚSTRIA METALURGICA LTDA	65	0,29
COMAU DO BRASIL IND.COM. LTDA.	63	0,28
IMETEC IND. METAL. TEC. LTDA	62	0,28
METAL GANS IND.COM. LTDA.	61	0,27
MANULI AUTO DO BRASIL LTDA.	60	0,27
OUTRAS	6.064	27,21
TOTAL	22.284	100,00

FONTE: Sindicato dos Metalúrgicos da Grande Curitiba - SIMEC (2005)

¹ Dados coletados diretamente com o Departamento de R.H. da empresa

2.2. O REÚSO DA ÁGUA

O conceito de reúso de água não é novo. São diversos os trabalhos que abordam aspectos desta questão, com a indicação das possíveis categorias de reúso. Dentre eles destacam-se os de Takashi Asano (ASANO e MILLS, 1990; ASANO 1991, e ASANO e LEVINE, 1996), de Ivanildo Hespanhol (HESPANHOL, 1990 e 1997) e de Menahem Rebhun (REBHUN e ENGEL, 1988), que apresentam e discutem, de forma abrangente, as principais categorias de reúso de água e os elementos essenciais ao planejamento e implantação.

Um dos conceitos mais antigos sobre reúso de água veio através da WHO - Organização Mundial da Saúde (1973) onde é definido reúso direto, indireto e reciclagem interna:

- Reúso direto: é o uso planejado e deliberado de esgotos tratados para certas finalidades como irrigação, uso industrial, recarga de aquíferos e água potável.
- Reúso indireto: ocorre quando a água já usada, uma ou mais vezes para o uso doméstico ou industrial, é descarregada nas águas superficiais ou subterrâneas e utilizada novamente a jusante, de forma diluída.
- Reciclagem: é o reúso da água internamente às instalações industriais, tendo como objetivo a economia de água e o controle da poluição.

No capítulo 14 de seu livro, MONTGOMERY (1985), substitui a palavra “intencional” e “não intencional” do adotado por WHO (1973) por “planejada” e “não planejada” respectivamente. LAVRADOR FILHO (1987), analisando a obra de MONTGOMERY, afirma que esse autor associa o reúso planejado à existência de um sistema de tratamento que atenda não apenas às exigências ambientais, mas também aos padrões de qualidade requeridos pelo reúso da água. Além disso, o termo “planejado” refere-se ao fato do reúso ser resultante de uma ação consciente, subsequente à descarga do efluente e o “não planejado” refere-se ao reúso ser apenas um subproduto não intencional dessa descarga.

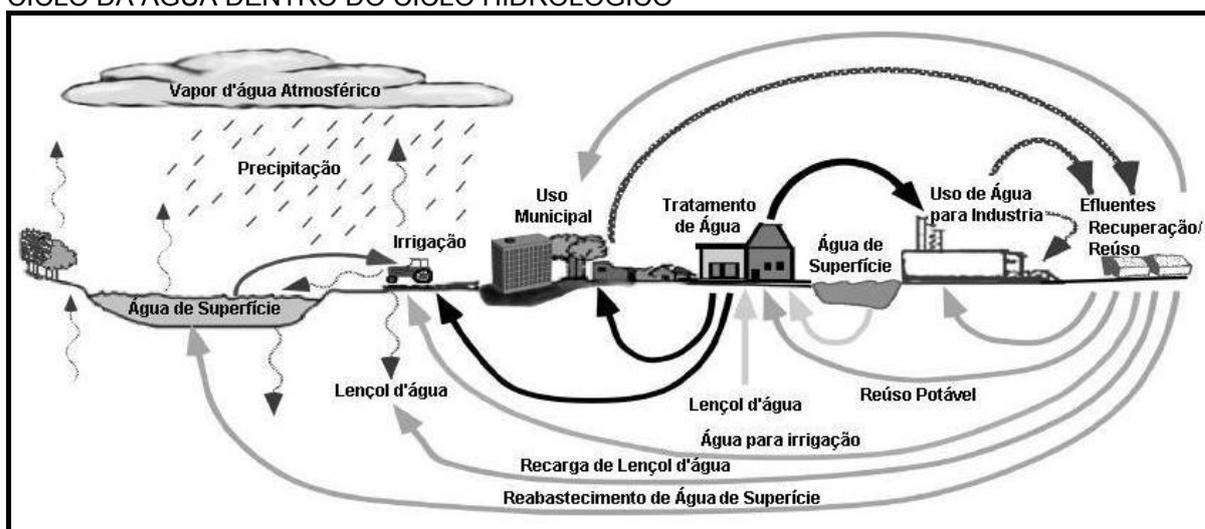
Segundo ASANO (1991), as tendências e fatores que motivam a recuperação e o reúso de água podem ser:

- A redução da poluição dos cursos de água;

- A disposição de efluentes tratados com elevado grau de qualidade;
- A promoção, a longo prazo, de uma fonte confiável de abastecimento de água;
- O gerenciamento da demanda de água em períodos de seca, no planejamento global dos recursos hídricos, e;
- O encorajamento da população para conservar água e adotar práticas de reúso.

ASANO (1996) também apresenta em seu artigo uma figura que ilustra conceitualmente as mudanças ocorridas na qualidade da água durante sua passagem pela comunidade. Nesta pode-se observar que a água não poluída, após passar pelo tratamento convencional de potabilização e ser consumida dentro da comunidade, tem sua qualidade degradada bruscamente. A seguir o tratamento convencional de esgotos recupera parte de sua qualidade, no entanto, sem atingir a qualidade suficiente para novo uso. É a partir deste momento que a recuperação e o reúso aparecem como uma forma de purificar e tornar a água passível de ser utilizada novamente, retornando à comunidade com qualidade satisfatória. Esta exposição da idéia de reúso pode ser observada na Figura 2.1.

FIGURA 2.1 – O EXEMPLO DE INSTALAÇÕES DE REÚSO, RECUPERAÇÃO E TRATAMENTO NO CICLO DA ÁGUA DENTRO DO CICLO HIDROLÓGICO



FONTE: Adaptado de ASANO (1996)

WESTERHOFF (1984) classifica reúso de água em duas grandes categorias: potável e não potável. Por sua praticidade e facilidade, essa classificação, foi adotada pela Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), seção São Paulo, tendo sido amplamente divulgada em sua série de Cadernos de Engenharia Sanitária e Ambiental em 1992. Neste trabalho, esta classificação é apresentada e também acrescentada nas seções 2.2.1 e 2.2.2 que seguem.

2.2.1. Reúso planejado para fins potáveis

O reúso para fins potáveis acontece de duas maneiras: de forma direta ou indireta. Segundo METCALF & EDDY (2003), três classes de constituintes de especial interesse podem afetar a água recuperada ou de reúso para uso potável, sendo estes: (1) vírus entéricos; (2) constituintes orgânicos incluindo, produtos químicos industriais, resíduos residenciais e medicamentos, e; (3) metais pesados.

As ramificações de vários destes constituintes relacionados à efeitos na saúde não são bem conhecidos, e, como resultado, as agências ambientais de regulação em todo o mundo procedem com muito cuidado no sentido de permitir a aplicação de água recuperada em fontes de água potável.

Onde existem pequenas possibilidades de desenvolver fontes de água de qualidade, algumas comunidades preferem e estão desenvolvendo plantas para o reúso potável indireto. Embora a quantidade de água envolvida no reúso potável ainda seja pequena, as pesquisas neste setor nos últimos anos vem avançando com o auxílio da criação de tecnologias avançadas no setor e com a previsão de aumento do valor do custo da água no futuro.

2.2.1.1. Reúso potável direto

O reúso potável direto ocorre quando o esgoto recuperado, por meio de tratamento avançado é diretamente reutilizado no sistema de água potável.

Esta forma de reúso é correntemente praticada em apenas uma cidade do mundo, Windhoek, na Namíbia. Esta cidade usa o reúso direto potável apenas como base intermitente. A mistura do sistema ocorre com 15% de esgoto tratado e 85% de água tratada.

Nos Estados Unidos, segundo US EPA (2004), a mais extensa pesquisa visando o reúso tem sido conduzida em Denver, Colorado; Tampa, Flórida; e San Diego, Califórnia. Um considerável investimento em pesquisas para reúso potável tem sido feito em Denver, Colorado, há mais de 20 anos. A pesquisa inclui operação de uma planta de água recuperada com vazão de 44 L/s por diferentes processos por um período superior a dez anos. A água resultante do processo foi relatada como tendo qualidade superior a muitas fontes de água da região. O *San Diego Total Resource Recovery Project* foi executado para demonstrar a viabilidade de usar sistemas naturais de tratamento secundários seguidos de tratamento avançado para proporcionar uma fonte de água equivalente, ou melhor, que as fontes de água importadas fornecidas àquela região.

2.2.1.1.1 Critérios para reúso potável direto

Como o reúso potável direto é raro, existem poucas fontes de dados no mundo para se comparar ou mesmo apresentar. Os Quadros 2.4 e 2.5 mostram os resultados alcançados pelo do Projeto San Diego referente às concentrações de minerais, metais e traços orgânicos do efluente tratado com tecnologias avançadas.

A seqüência do tratamento usado em San Diego, após o tratamento secundário, inclui os seguintes processos:

- Coagulação com cloreto férrico;
- Filtração multimeios;
- Desinfecção por ultravioleta;
- Ajuste de pH com ácido sulfúrico;
- Filtro cartucho, e;
- Osmose reversa.

QUADRO 2.4 – RESULTADOS FÍSICO-QUÍMICOS DAS AMOSTRAS DO ESTUDO PARA REÚSO POTÁVEL EM SAN DIEGO - US

Constituinte	Número de Amostras	Unidade	Limite de Detecção Mínimo	Número de Amostras < LDM ^a	Média aritmética	Desvio Padrão
Geral						
DQO	611	mg/L	15	6	<15,0	44,8 ^b
pH	892	-	na	892	8,2	0,2
SS	116	mg/L	1	68	1,6	3,5
COT	911	mg/L	1	85	<1,0	3,0 ^b
Ânions						
Cloreto	97	mg/L	4	96	33,93	31,39
Fluoreto	37	mg/L	0,13	13	<0,125	0,33 ^b
Amônia	71	mg/L	0,1	69	1,26	2,04
Nitrito	37	mg/L	0,01	13	<0,01	0,05 ^b
Nitrato	91	mg/L	0,05	91	1,81	1,21
Fosfato	88	mg/L	1	28	<1,00	2,70 ^b
Silicato	39	mg/L	0,2	39	1,2	0,42
Sulfato	96	mg/L	0,1	96	6,45	5,72
Cátions						
Boro	24	mg/L	0,1	24	0,24	0,085
Cálcio	21	mg/L	1	16	3,817	12,262
Ferro	21	mg/L	0,01	20	0,054	0,077
Magnésio	21	mg/L	0,5	16	1,127	6,706
Manganês	21	mg/L	0,008	18	0,011	0,041
Potássio	21	mg/L	0,5	14	0,608	2,599
Sódio	21	mg/L	1	20	16,999	15,072
Zinco	20	mg/L	0,005	15	0,009	0,008

FONTE: WEF/AWWA (1998), adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

^a LDM – Limite de Detecção do Método

^b Análise apresentou resultado negativo para a média

Apesar de todo o monitoramento e tecnologia empregados na recuperação da água para reúso direto, esta modalidade não deverá ser adotada nos Estados Unidos em um futuro próximo por diversas razões, as quais se podem citar:

- A relutância na aceitação da opinião pública ao reúso direto e seus riscos relacionados à saúde pública;
- O fato de o reúso indireto ser mais aceitável que o reúso direto pela sociedade, devido ela passar por um processo de “lavagem” através de rios, lagos ou aquíferos. Esta opinião possui argumentos a favor quando se tem a possibilidade corrigir problemas antes desta água entrar na distribuição e contra quando muitas vezes esta água é degradada quando passa através de ambientes mais poluídos que ela;
- O reúso direto raramente será aplicado em grande escala. Apenas uma pequena parte da água usada pela comunidade precisa ser potável. Enquanto as fontes de água de alta qualidade se tornarem muitas vezes inadequadas

para servir todos os usos urbanos no futuro, vai aumentar uso de água recuperada para substituir esta água potável de alta qualidade no uso não potável, reduzindo a pressão nos aquíferos e liberando mais água potável para uso futuro.

QUADRO 2.5 – RESULTADOS PARA METAIS PESADOS E TRAÇOS ORGÂNICOS REFERENTE ÀS AMOSTRAS DO ESTUDO PARA REÚSO POTÁVEL EM SAN DIEGO - US

Constituinte	Número de Amostras	Unidade	Limite de Detecção Mínimo ^a	Número de Amostras > LDM	Média aritmética	Desvio Padrão
Metais						
Arsênio	11	ug/L	1	5	<1	8 ^b
Cádmio	10	ug/L	1	1	1	0,3
Cromo	19	ug/L	1	10	2	3
Cobre	20	ug/L	6	18	18	20
Chumbo	18	ug/L	1	15	3	7
Mercúrio	8	ug/L	1	0	1	0 ^c
Níquel	20	ug/L	1,2	19	6	7
Selênio	12	ug/L	6	2	4	3 ^c
Prata	16	ug/L	5	2	3	4
Orgânicos						
Bis (2-etil hexil Ftalato	33	ug/L	2,5	6	<2,5	3,27 ^b
Benzil/Butil/Ftalato	33	ug/L	2,5	1	2,5	0,02 ^c
Bromodiclorometano	33	ug/L	3,1	0	3,1	0,00 ^c
Clorofórmio	33	ug/L	1,6	0	1,6	0,00 ^c
Dibutil Ftaleno	33	ug/L	2,5	1	2,64	0,78 ^c
Dimetilfenol	33	ug/L	2,7	0	2,7	0,00 ^c
Metil cloreto	33	ug/L	2,8	6	<2,8	7,91 ^b
Naftaleno	33	ug/L	1,6	0	1,6	0
1,1,1 - Trocloroetano	33	ug/L	3,8	0	3,8	0
1,2 - Diclorobenzeno	33	ug/L	4,4	0	4,4	0
4-Notrofenol	33	ug/L	2,4	0	2,4	0
Pentaclorofenol	33	ug/L	3,6	0	3,6	0
Fenol	33	ug/L	1,5	0	1,5	0

FONTE: WEF/AWWA (1998) adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

^a < LDM (Limite de Detecção do Método) foi feito para ser igual à LDM

^b Análise apresentou resultado negativo para a média

^c A estatística foi calculada usando fórmulas convencionais

2.2.1.2. Reúso potável indireto

O reúso potável indireto é o caso em que o esgoto, após tratamento, é disposto na coleção de águas superficiais ou subterrâneas para diluição, purificação natural e subsequente captação, tratamento e finalmente utilizado como água potável. Dentro deste conceito, segundo MANCUSO e SANTOS (2003), destacam-se as seguintes possibilidades:

- Descarga do efluente tratado nos mananciais de superfície, com captação da mistura – efluente tratado e água natural – à jusante e diretamente no manancial;
- As águas dos mananciais de superfície, que receberam descargas de efluentes tratados à montante, são captadas indiretamente por meio de sua infiltração pelas margens do corpo de água à jusante, através de poços;
- Recarga de aquífero subterrâneo pela infiltração direta de efluentes tratados, ou de águas de mananciais superficiais que tenham recebido descargas de efluente à montante. As águas do aquífero subterrâneo são captadas à jusante através de poços. A recarga artificial do aquífero pode ser feita pelos processos de infiltração-percolação ou injeção direta.

Nos Estados Unidos, o reúso potável direto não é praticado. Por outro lado, o reúso indireto potável é implementado em diversos sistemas de fornecimento de água potável através da recarga de aquíferos subterrâneos. Diversas instalações têm sido construídas para avaliar o potencial dos sistemas de reúso potável direto e indireto. A seguir são apresentados alguns exemplos destas instalações (ASANO, 1998; NCR, 1998):

- Departamento de água de Denver – Projeto de demonstração de reúso potável direto de água, 1979-1990;
- Planta experimental de tratamento de água Potomac estuário, 1980 – 1983;
- Distrito municipal de saneamento de Los Angeles – Projeto municipal de recarga de aquífero, 1992 - atualmente;
- Distrito municipal de água de Orange, Califórnia – Usina de Água 21, 1972 – atualmente;
- Planta de recuperação de água Fred Hervey, El Paso, Texas – Recarga de Aquífero, 1985 – atualmente;
- Cidade de San Diego – Projeto Recuperação Total de Recursos, 1984 – 1999.
- Cidade de Tampa, Flórida - Projeto Recuperação de Recursos da Água, 1993;

Outro exemplo de reúso potável indireto é o do reservatório de Occoquan, no norte da Virgínia. O efluente altamente tratado da cidade de Manassas, à uma vazão de 57.000 m³/dia, é descartado diretamente dentro do reservatório Occoquan, a principal fonte de água potável de mais de 660.000 moradores (METCALF & EDDY, 2003).

2.2.1.2.1 Critérios para reúso potável indireto

A EPA (2004), Agência de Proteção Ambiental americana, em seu guia de reúso de água, sugere diretrizes para o reúso de água em países e localidades que não possuem legislação formada. Entretanto, deve-se ter consciência de que estas diretrizes mostradas no Quadro 2.6 não devem ser consideradas como definitivas, mas sim uma orientação para a prática do reúso de água. Este quadro também apresenta os tipos de reúso, o tratamento mínimo que o efluente deve possuir, a qualidade que a água de reúso deve possuir, o tipo de monitoramento e sua periodicidade, a distância mínima que a prática do reúso deve ter de fontes de água potável e alguns comentários importantes à prática do mesmo.

QUADRO 2.6 – CRITÉRIOS E DIRETIZES DA U.S. E.P.A. PARA REÚSO POTÁVEL INDIRETO (continua)

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada ¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção ²	Comentários
<p><i>Reúso Potável Indireto</i></p> <p>Recarga de águas subterrâneas por infiltração / percolação em aquíferos potáveis.</p>	<p>- Secundário; - Desinfecção; - Pode também ser preciso filtração e, se houver necessidade, tratamento avançado de efluentes³.</p>	<p>- Secundária; - Desinfetada; - Chegar aos padrões de água potável depois de percolado através da zona não saturada.</p>	<p>Inclusive, mas não limitados aos que seguem: - pH – diário; - Coliformes – diário; - Cl₂ residual – contínuo; - Padrões para água potável – trimestral; - Outros⁹ – dependem dos constituintes; - DBO – semanal; - Turbidez – contínua.</p>	<p>- 150 metros de poços de extração. Pode variar dependendo do tratamento feito e das condições de especificação local.</p>	<p>- A espessura de solo sobre as águas subterrâneas (Ex.: espessura da zona não saturada (vadose zone)) deve ser de pelo menos 2 metros no ponto mais alto do aquífero subterrâneo; - A água recuperada deve ficar retida nas águas subterrâneas por pelo menos 6 meses antes da retirada; - Níveis de tratamento recomendados no campo dependem de valores tais como tipo de solo, taxa de percolação, espessura da zona não saturada (vadose zone), qualidade da água nativa e diluição; - O monitoramento dos poços é necessário para detectar a influência da operação de recarga nas águas subterrâneas; - A água recuperada não deve conter níveis mensuráveis de patógenos viáveis depois da percolação através da zona não saturada.</p>
<p><i>Reúso Potável Indireto</i></p> <p>Recarga de águas subterrâneas por injeção em aquíferos potáveis.</p>	<p>- Secundário; - Filtração; - Desinfecção; - Tratamento avançado de efluentes³.</p>	<p>Inclusive, mas não limitados aos que seguem: - pH = 6,5-8,5; - ≤ 2 NTU⁵; - coliformes fecais não detectáveis em 100 mL^{6,7}; - 1 mg/L Cl₂ residual (mínimo)⁴; - ≤ 3 mg/L de COT; - ≤ 0,2 mg/L TOX; - Chegar aos padrões de água potável.</p>	<p>Inclusive, mas não limitados aos que seguem: - pH – diário; - Turbidez - contínua; - Coliformes totais – diário; - Cl₂ residual – contínuo; - Padrões para água potável – trimestral; - Outros⁹ – dependem dos constituintes.</p>	<p>- 600 metros de poços de extração. Pode variar dependendo das condições de especificação local.</p>	<p>- A água recuperada deve ficar retida nas águas subterrâneas por pelo menos 9 meses antes da retirada; - O monitoramento dos poços é necessário para detectar a influência da operação de recarga nas águas subterrâneas; - Os limites de qualidade recomendados devem ser alcançados no ponto de injeção; - A água recuperada não deve conter níveis mensuráveis de patógenos viáveis; - Um alto residual de cloro e/ou longo tempo de contato devem ser necessários para assegurar que vírus e parasitas estejam inativos ou destruídos.</p>

QUADRO 2.6 – CRITÉRIOS E DIRETIZES DA U.S. E.P.A. PARA REÚSO POTÁVEL INDIRETO (conclusão)

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada ¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção ²	Comentários
<p><i>Reúso Potável Indireto</i></p> <p>Acréscimo/aumento de fontes superficiais.</p>	<p>- Secundário; - Filtração; - Desinfecção; - Tratamento avançado de efluentes³.</p>	<p>Inclusive, mas não limitados aos que seguem: - pH = 6,5-8,5; - ≤ 2 NTU⁵; - Coliformes fecais não detectáveis em 100 mL^{6,7}; - 1mg/l Cl₂ residual (mínimo)⁴; - ≤ 3 mg/L de COT; - Chegar aos padrões de água potável.</p>	<p>Inclusive, mas não limitados aos que seguem: - pH – diário; - Turbidez - contínua; - Coliformes totais - diário; - Cl₂ residual – contínuo; - Padrões para água potável – trimestral; - Outros⁹ – dependem dos constituintes.</p>	<p>- Especificado no local;</p>	<p>- Níveis de tratamento recomendados no campo dependem de valores tais como a qualidade da água receptora, o tempo e distância do ponto de retirada, diluição e subsequente tratamento prévio de distribuição para usos potáveis; - A água recuperada não deve conter níveis mensuráveis de patógenos viáveis; - Um alto residual de cloro e/ou longo tempo de contato devem ser necessários para assegurar que vírus e parasitas estejam inativos ou destruídos.</p>

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ Salvo notações diferentes, a aplicação dos limites de qualidade recomendados para água recuperada é no ponto de descarte das instalações de tratamento

² Distâncias mínimas de proteção são recomendadas para proteger as fontes de água potável de contaminações e para proteger pessoas de riscos a saúde devido à exposição à água recuperada

³ Processos de tratamento avançado de efluentes incluem clarificação química, adsorção com carvão ativado, osmose reversa e outros processos com membranas, air stripping, ultrafiltração e troca iônica

⁴ Tempo mínimo de contato: 30 minutos

⁵ Valor médio de 24h, não excedendo 5 NTU em nenhum estante. Se SST for usado no lugar da turbidez, o SST não deve exceder 5 mg/L

⁶ Baseado numa média de 7 dias (técnicas usadas: fermentação em tubos ou filtro membranas).

⁷ O número de coliformes fecais não devem exceder 14/100 mL em nenhuma amostra

⁸ O número de coliformes fecais não devem exceder 800/100 mL em nenhuma amostra. Algumas lagoas de estabilização podem estar aptas a atingir estes limites de coliformes sem desinfecção

⁹ O monitoramento deve incluir compostos orgânicos e inorgânicos, ou classes de compostos, que são conhecidos ou suspeitos de serem tóxicos, carcinogênicos, teratogênicos, ou mutagênicos e que não estejam incluídos nos parâmetros de água potável

Segundo a US EPA (2004) quatro estados americanos possuem legislação própria relativas ao reúso potável indireto, como pode ser visto no Quadro 2.7. Os estados da Califórnia e Havaí não especificam os tipos de processo de tratamento e determinam os parâmetros caso a caso, dependendo do local, uso e tipo de água que será reusada. No caso da Flórida, esta ainda requer uma separação horizontal entre a zona de descarte do efluente e a fonte de água potável de 150 metros. Para o estado de Washington esta distância aumenta para 610 metros.

QUADRO 2.7 – CRITÉRIOS E DIRETIZES PARA REÚSO POTÁVEL INDIRETO ALGUNS ESTADOS AMERICANOS

	Califórnia ¹	Florida ²	Havaí	Washington
Tratamento	4	Tratamento avançado, filtração e desinfecção de alto nível	4	Oxidado, coagulado, filtrado, tratado por osmose reversa e desinfectado
DBO₅	4	20 mg/L	4	5 mg/L
SST	4	5 mg/L	4	5 mg/L
Turbidez	4	NE ³	4	0,1 NTU (méd) 0,5 NTU (máx)
Coliformes	4	Totais Todas as amostras não detectáveis	4	Totais 1/100 ml (méd) 5/100 ml (máx)
Nitrogênio Total	4	10 mg/L	4	10 mg/L
COT	4	3 mg/L (méd) 5 mg/L (máx)	4	1 mg/L
Padrões primários e secundários	4	Em conformidade com a maioria dos padrões primários e secundários	4	Em conformidade com a maioria dos padrões primários e secundários

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ Reúso potável indireto na Califórnia e Havaí são determinados se baseando caso a caso

² As exigências na Flórida são para reúso planejado de água recuperada para aumento das fontes de águas superficiais que serão usadas como fonte de água doméstica

³ NE – Não especificado pelas leis do estado

⁴ Baseado caso a caso

2.2.2. Reúso planejado para fins não potáveis

2.2.2.1. Reúso planejado de água para fins urbanos não potáveis

A modalidade de reúso não potável para fins urbanos é caracterizada pela utilização de efluente tratado para suprir as várias necessidades urbanas que admitem qualidade inferior à potável. Segundo a US EPA (2004), o reúso urbano não potável é subdivido em duas categorias: as de áreas com acesso controlado e não controlado.

O reúso urbano com acesso não controlado envolve o uso de água de reúso diretamente nos locais onde o público tem contato. Por isto esta água necessita de um alto grau de tratamento. Em todos os estados americanos que possuem regulamentação, especificam no mínimo tratamento secundário e desinfecção para água com esta finalidade.

O uso de água de reúso para locais onde o acesso público não é controlado, são: irrigação de parques, *playgrounds*, pátios de escolas e residências onde o acesso público não é controlado; descarga em aparelhos sanitários, ar

condicionado, prevenção contra incêndio, construção civil, limpeza de ruas, fontes ornamentais e lagos e espelhos de água com função estética.

Quando o acesso é controlado em áreas onde exista a aplicação de água de reúso, esta pode ter um grau inferior de tratamento comparado com a água aplicada em áreas de acesso não controlado.

Os usos de água de reúso onde o acesso público pode ser controlado, são: a irrigação de campos de golf, cemitérios e rodovias intermediárias.

2.2.2.1.1 Critérios para reúso urbanos não potáveis

A US EPA (2004) também sugere em seu guia de reúso de água, diretrizes para países e localidades que não possuem legislação formada. O Quadro 2.8 apresenta estes critérios e diretrizes para a prática do reúso de água na área urbana.

QUADRO 2.8 – CRITÉRIOS E DIRETIZES DA U.S. E.P.A. PARA ÁGUA DE REÚSO URBANO NÃO POTÁVEL (continua)

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada ¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção ²	Comentários
<p><i>Reúso Urbano</i></p> <p>Todos os tipos de áreas paisagísticas para irrigação (Ex.: campos de golfe, parques, cemitérios). Também lavagem de veículos, descarga sanitária, sistemas de proteção contra incêndio, ar condicionado e outros usos com acesso ou exposição similar a água.</p>	<p>- Secundário; - Filtração; - Desinfecção.</p>	<p>- pH= 6-9; - ≤ 10mg/l DBO; - ≤ 2 NTU⁴; - Coliformes fecais não detectáveis em 100ml^{5,6}; - 1mg/L Cl₂ residual (mínimo)³.</p>	<p>- pH – semanal; - DBO – semanal; - Turbidez – contínua; - Coliformes – diário; - Cl₂ residual – contínuo.</p>	<p>- 15 metros de fontes fornecedoras de água potável.</p>	<p>- Em locais de irrigação com acesso controlado onde o projeto e as medidas operacionais reduzem significativamente o potencial do contato público com água recuperada, um nível mais baixo do tratamento (Ex.: Trat. secundário e desinfecção atingindo ≤ 14 coliformes fecais em 100mL) podem ser apropriados; - A adição de coagulante e/ou polímero antes da filtração pode ser necessária para chegar às recomendações de qualidade da água; - Cloro residual de 0.5 mg/L ou um mais no sistema da distribuição é recomendado para reduzir odores, limo e o crescimento bacteriano; - A água recuperada não deve conter níveis mensuráveis de patógenos viáveis.</p>

QUADRO 2.8 – CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA ÁGUA DE REÚSO URBANO NÃO POTÁVEL (conclusão)

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada ¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção ²	Comentários
<i>Construção Civil</i> Compactação de solo, controle de poeira, lavagem de agregados e confecção de concreto.	- Secundário; - Desinfecção.	- ≤ 30 mg/L DBO; - ≤ 30 mg/L SST; - ≤ 200 coliformes fecais em 100 mL ^{5,7} ; - 1 mg/L Cl ₂ residual (mínimo) ³ .	- DBO – semanal; - SST – diário; - Coliformes – diário; - Cl ₂ residual – contínuo.		- O contato do trabalhador com a água deve ser minimizado; - Um alto nível de desinfecção (Ex.: ≤ 14 coliformes fecais em 100 mL) deve ser alcançado quando o trabalho possuir provável contato frequente com água recuperada.
<i>Reservatórios e/ou lagos para paisagismo</i> Reservatórios e lagos de função estética onde o contato público com a água não é permitido.	- Secundário; - Desinfecção.	- ≤ 30 mg/L DBO; - ≤ 30 mg/L SST; - ≤ 200 Coliformes fecais em 100 mL ^{5,7} ; - 1 mg/L Cl ₂ residual (mínimo) ³ .	- pH – semanal; - SST – diário; - Coliformes – diário; - Cl ₂ residual – contínuo.	- Mínimo de 150 metros de distância de fontes de água potável se fundo não for impermeável.	- A remoção de nutrientes pode ser necessária para evitar o crescimento de algas nos reservatórios/lagos; - A descloração pode ser necessária para proteger espécies aquáticas da fauna e flora.

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ Salvo notações diferentes, a aplicação dos limites de qualidade recomendados para água recuperada é no ponto de descarte das instalações de tratamento

² Distâncias mínimas de proteção são recomendadas para proteger as fontes de água potável de contaminações e para proteger pessoas de riscos a saúde devido à exposição à água recuperada

³ Tempo mínimo de contato: 30 minutos

⁴ Valor médio de 24h, não excedendo 5 NTU em nenhum estante. Se SST for usado no lugar da turbidez, o SST não deve exceder 5 mg/L

⁵ Baseado numa média de 7 dias (técnicas usadas: fermentação em tubos ou filtro membranas)

⁶ O numero de coliformes fecais não devem exceder 14/100 mL em nenhuma amostra

⁷ O numero de coliformes fecais não devem exceder 800/100mL em nenhuma amostra. Algumas lagoas de estabilização podem estar aptas a atingir estes limites de coliformes sem desinfecção

Alguns estados americanos possuem legislação definida para o reúso urbano não potável em áreas de acesso não controladas. Para estes locais se aplicam critérios apresentados no Quadro 2.9. Estes mesmos estados também fazem menção em suas legislações para o reúso urbano não potável em áreas de acesso controladas. Com exceção da Flórida, que mantém as mesmas diretrizes para reúso de áreas controladas e não controladas, o restante dos estados possuem diretrizes mais brandas para o caso de reúso em áreas controladas. No Quadro 2.10 são apresentados estes critérios, diretrizes e tratamento para áreas de acesso controlado.

QUADRO 2.9 – CRITÉRIOS, DIRETRIZES E TRATAMENTO DA ÁGUA RECUPERADA PARA REÚSO URBANO NÃO CONTROLADO EM ALGUNS ESTADOS AMERICANOS

	Arizona	Califórnia	Flórida	Haváí	Nevada	Texas	Washington
Tratamento	Secundário, filtração e desinfecção	Oxidado, coagulado, filtrado e desinfectado	Secundário, filtrado e desinfecção de alto nível	Oxidado, filtrado e desinfectado	Secundário e desinfecção	NE ¹	Oxidado, coagulado, filtrado e desinfectado
DBO₅	NE ¹	NE ¹	20 mg/L DBO ₅ carbonácea	NE ¹	30 mg/L	5 mg/l	30 mg/L
SST	NE ¹	NE ¹	5 mg/L	NE ¹	NE ¹	NE ¹	30 mg/L
Turbidez	2 NTU (Méd) 5 NTU (Max)	2 NTU (Méd) 5 NTU (Max)	NE ¹	2 NTU (max)	NE ¹	3 NTU	2 NTU (Méd) 5 NTU (Max)
Coliformes	Fecal	Total	Fecal	Fecal	Fecal	Fecal	Total
	Não detectável (Méd)	2,2/100 mL (Méd)	75% das amostras não detectáveis	2,2/100 mL (Méd)	2,2/100 mL (Méd)	20/100 mL (Méd)	2,2/100 mL (Méd)
	23/100 mL (Max)	23/100 mL (Max em 30 dias)	25/100 mL (Max)	23/100 mL (Max em 30 dias)	23/100 mL (Max)	75/100 mL (Max)	23/100 mL (Max)

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ NE – Não especificado pelas leis do estado

QUADRO 2.10 – CRITÉRIOS, DIRETRIZES E TRATAMENTO DA ÁGUA RECUPERADA PARA REÚSO URBANO CONTROLADO EM ALGUNS ESTADOS AMERICANOS

	Arizona	Califórnia	Flórida	Haváí	Nevada	Texas	Washington
Tratamento	Secundário e desinfecção	Secundário – 23, oxidado e desinfectado	Secundário, filtrado e desinfecção de alto nível	Oxidado e desinfectado	Secundário e desinfecção	NE ¹	Oxidado e desinfectado
DBO₅	NE ¹	NE ¹	20 mg/L DBO ₅ carbonácea	NE ¹	30 mg/L	20 mg/L	30 mg/L
SST	NE ¹	NE ¹	5 mg/l	NE ¹	NE ¹	NE ¹	30 mg/L
Turbidez	NE ¹	NE ¹	NE ¹	2 NTU (max)	NE ¹	3 NTU	2 NTU (Méd) 5 NTU (Max)
Coliformes	Fecal	Total	Fecal	Fecal	Fecal	Fecal	Total
	200/100 mL (Méd)	23/100 mL (Méd)	75% das amostras não detectáveis	23/100 mL (Méd)	23/100 mL (Méd)	200/100 mL (Méd)	23/100 mL (Méd)
	800/100 mL (Max)	240/100 mL (Max em 30 dias)	800/100 mL (Max)	200/100 mL (Max)	240/100 mL (Max)	800/100 mL (Max)	240/100 mL (Max)

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ NE – Não especificado pelas leis do estado

Em seu relatório técnico a WHO (1989) também faz menção aos limites de coliformes e nematóides para água de reúso na irrigação de áreas urbanas, pastos e árvores (Quadro 2.11).

QUADRO 2.11 – CRITÉRIOS DA OMS PARA A QUALIDADE MICROBIOLÓGICA E TRATAMENTO REQUERIDO PARA REÚSO DE EFLUENTE DOMÉSTICO

Tipo de reúso	Limite para CF	Limite para nematóides (<i>ascaris</i> e <i>trichiurus</i>) (Ovos/100mL)	Tratamento Requerido
Irrigação de campos desportivos e parques públicos	1000/100 mL	1	Lagoas de estabilização em série, ou tratamento equivalente para obtenção da qualidade microbiológica.
Irrigação de pasto, árvore, entre outros.	Nenhum padrão especificado	1	Lagoas de estabilização com tempo de detenção variando de 8 a 10 dias, ou tratamento equivalente na remoção de helmintos e CF.

FONTE: WHO (1989)

NOTA: No caso de irrigação de gramados públicos onde o contato seja direto é recomendado o limite de 200CF/200mL

2.2.2.2. Reúso planejado de água para fins agrícolas

O reúso não potável para fins agrícolas é caracterizado pela utilização de efluente tratado para irrigação de culturas que, segundo WESTERHOFF (1984), são apresentados em dois grupos:

- Primeiro grupo: plantas não comestíveis: silvicultura, pastagens, fibras e sementes.
- Segundo grupo: aqui são consideradas as plantas consumidas cozidas e as plantas comidas cruas.

O reúso além da irrigação é aplicável também para dessedentação de animais. Deve-se salientar que, quando da prática da modalidade de reúso agrícola, via de regra há como subproduto a recarga do lençol subterrâneo pela percolação através do solo.

2.2.2.2.1 Critérios para reúso em atividades agrícolas

O reúso não potável para fins agrícolas é a possibilidade mais estudada e também a mais regulamentada. A demanda atual de água para o setor agrícola brasileiro representa, atualmente, 70% do uso consumptivo total e possui forte tendência para chegar a 80% até o final desta década (MANCUSO e SANTOS, 2003).

A US EPA (2004), em seu guia de reúso de água, sugere diretrizes para o reúso agrícola na irrigação de culturas não processadas comercialmente, culturas

processadas e para pastagem, cultura de grãos, fibras e forragens. O Quadro 2.12 apresenta estes critérios e diretrizes para a prática do reúso de água em atividades agrícolas.

QUADRO 2.12 – CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA ÁGUA DE REÚSO VISANDO ATIVIDADES AGRÍCOLAS (continua)

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção²	Comentários
<i>Reúso Agrícola - Culturas não processadas comercialmente</i> Irrigação superficial ou por aspersão de qualquer cultura, incluindo alimentos comidos cru.	- Secundário; - Filtração; - Desinfecção.	- pH= 6-9; - ≤ 10 mg/L DBO; - ≤ 2 NTU ⁴ ; - Coliformes fecais não detectáveis em 100 mL ^{5, 6} ; - 1 mg/L Cl ₂ residual (mínimo) ³ .	- pH – semanal; - DBO – semanal; - Turbidez – contínua; - Coliformes – diário; - Cl ₂ residual – contínuo.	- Mínimo de 15 metros de distância de fontes de água potável;	- A adição de coagulante e/ou polímero antes da filtração pode ser necessária para chegar às recomendações de qualidade da água; - A água recuperada não deve conter níveis mensuráveis de patógenos viáveis; - Um alto residual de cloro e/ou longo tempo de contato devem ser necessários para assegurar que vírus e parasitas estejam inativos ou destruídos; - Altos níveis de nutrientes podem ser prejudiciais para algumas culturas durante certas fases do crescimento.
<i>Reúso Agrícola - Culturas processadas comercialmente</i> Irrigação superficial de pomares e vinhedos.	- Secundário; - Desinfecção.	- pH= 6-9; - ≤ 30 mg/L DBO; - ≤ 30 mg/L SST; - ≤ 200 Coliformes fecais em 100 mL ^{5, 7} ; - 1 mg/L Cl ₂ residual (mínimo) ³ .	- pH – semanal; - DBO – semanal; - SST – diário; - Coliformes – diário; - Cl ₂ residual – contínuo.	- Mínimo de 90 metros de fontes de água potável; - Mínimo de 30 metros de áreas acessíveis ao público (se for irrigação por spray).	- Se a irrigação for por spray, será necessário que o SST seja menor que 30 mg/L para evitar o entupimento das cabeças de aspersão (sprinkler heads). - Altos níveis de nutrientes podem ser prejudiciais para algumas culturas durante certas fases do crescimento.
<i>Reúso Agrícola - Outros usos não sendo cultura de alimentos</i> Pastagem para gado leiteiro; culturas de grãos, fibras e forragem.	- Secundário; - Desinfecção.	- pH= 6-9; - ≤ 30 mg/L DBO; - ≤ 30 mg/L SST; - ≤ 200 Coliformes fecais em 100 mL ^{5, 7} ; - 1mg/l Cl ₂ residual (mínimo) ³ .	- pH – semanal; - DBO – semanal; - SST – diário; - Coliformes – diário; - Cl ₂ residual – contínuo.	- Mínimo de 90 metros de fontes de água potável; - Mínimo de 30 metros de áreas acessíveis ao público (se for irrigação por spray).	- Se a irrigação for por spray, será necessário que o SST seja menor que 30 mg/L para evitar o entupimento das cabeças de aspersão (sprinkler heads). - Altos níveis de nutrientes podem ser prejudiciais para algumas culturas durante certas fases do crescimento. - Gado leiteiro deve ser proibido de pastar por 15 dias depois do término da irrigação. Um alto nível de desinfecção (Ex.: ≤ 14 coliformes fecais em 100 mL) deve ser alcançado se este período de espera não for respeitado.

QUADRO 2.12 – CRITÉRIOS E DIRETRIZES DA U.S. E.P.A. PARA ÁGUA DE REÚSO VISANDO ATIVIDADES AGRÍCOLAS (conclusão)

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada ¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção ²	Comentários
<p><i>Irrigação de áreas com acesso restrito</i></p> <p>Fazendas de gramas, áreas para silvicultura e outras áreas onde o acesso público é proibido, restrito ou raro.</p>	<p>- Secundário; - Desinfecção.</p>	<p>- pH= 6-9; - ≤ 30 mg/L DBO; - ≤ 30 mg/L SST; - ≤ 200 Coliformes fecais em 100 mL^{5,7}; - 1mg/L Cl₂ residual (mínimo)³.</p>	<p>- pH – semanal; - DBO – semanal; - SST – diário; - Coliformes – diário; - Cl₂ residual – contínuo.</p>	<p>- Mínimo de 90 metros de fontes de água potável; - Mínimo de 30 metros de áreas acessíveis ao público (se for irrigação por spray).</p>	<p>- Se a irrigação for por spray, será necessário que o SST seja menor que 30 mg/L para evitar o entupimento das cabeças de aspersão (sprinkler heads).</p>

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ Salvo notações diferentes, a aplicação dos limites de qualidade recomendados para água recuperada é no ponto de descarte das instalações de tratamento

² Distâncias mínimas de proteção são recomendadas para proteger as fontes de água potável de contaminações e para proteger pessoas de riscos a saúde devido à exposição à água recuperada.

³ Tempo mínimo de contato: 30 minutos

⁴ Valor médio de 24h, não excedendo 5 NTU em nenhum estante. Se SST for usado no lugar da turbidez, o SST não deve exceder 5 mg/L

⁵ Baseado numa média de 7 dias (técnicas usadas: fermentação em tubos ou filtro membranas)

⁶ O número de coliformes fecais não devem exceder 14/100 mL em nenhuma amostra

⁷ O número de coliformes fecais não devem exceder 800/100 mL em nenhuma amostra. Algumas lagoas de estabilização podem estar aptas a atingir estes limites de coliformes sem desinfecção

Segundo a US EPA (2004), o uso de água recuperada para irrigação de culturas comestíveis é proibido em alguns estados americanos, enquanto outros permitem apenas irrigação em culturas comestíveis se estas culturas forem processadas e não comidas cruas. O estado de Nevada permite apenas a irrigação superficial de árvores frutíferas e de nozes. No Quadro 2.13 são apresentados os critérios, diretrizes e tratamento para reúso de água recuperada em culturas comestíveis.

No caso de reúso de água recuperada para irrigação de culturas não comestíveis, a exposição humana ao risco reduz, fazendo com que os critérios de qualidade exigidos para a água recuperada sejam menos restritivos. Com exceção do Texas, que não especifica o tipo de tratamento, a maioria dos estados requer tratamento secundário seguido de filtração, apesar de o Havaí requerer também filtração. No Quadro 2.14 são apresentados os critérios, diretrizes e tratamento para reúso de água recuperada em culturas comestíveis.

QUADRO 2.13 – CRITÉRIOS, DIRETRIZES E TRATAMENTO DA ÁGUA RECUPERADA PARA REÚSO NA AGRICULTURA EM ALGUNS ESTADOS AMERICANOS – CULTURAS COMESTÍVEIS

	Arizona	Califórnia	Flórida	Havai	Nevada	Texas	Washington
Tratamento	Secundário, filtração e desinfecção	Oxidado, coagulado, filtrado e desinfectado	Secundário, filtrado e desinfecção de alto nível	Oxidado, filtrado e desinfectado	Secundário e desinfecção	NE ¹	Oxidado, coagulado, filtrado e desinfectado
DBO₅	NE ¹	NE ¹	20 mg/L DBO ₅ carbonácea	NE ¹	30 mg/L	5 mg/L	30 mg/L
SST	NE ¹	NE ¹	5 mg/L	NE ¹	NE ¹	NE ¹	30 mg/L
Turbidez	2 NTU (Méd) 5 NTU (Max)	2 NTU (Méd) 5 NTU (Max)	NE ¹	2 NTU (max)	NE ¹	3 NTU	2 NTU (Méd) 5 NTU (Max)
Coliformes	Fecal	Total	Fecal	Fecal	Fecal	Fecal	Total
	Não detectável (Méd)	2,2/100 mL (Méd)	75% das amostras não detectáveis	2,2/100 mL (Méd)	200/100 mL (Méd)	20/100 mL (Méd)	2,2/100 mL (Méd)
	23/100 mL (Max)	23/100 mL (Max em 30 dias)	25/100 mL (Max)	23/100 mL (Max em 30 dias)	400/100 mL (Max)	75/100 mL (Max)	23/100 mL (Max)

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ NE – Não especificado pelas leis do estado

QUADRO 2.14 – CRITÉRIOS, DIRETRIZES E TRATAMENTO DA ÁGUA RECUPERADA PARA REÚSO NA AGRICULTURA EM ALGUNS ESTADOS AMERICANOS – CULTURAS NÃO COMESTÍVEIS

	Arizona	Califórnia	Flórida	Havai	Nevada	Texas	Washington
Tratamento	Secundário e desinfecção	Secundário – 23, oxidado e desinfectado	Secundário, e desinfecção básica	Oxidado, filtrado e desinfectado	Secundário e desinfecção	NE ¹	Oxidado e desinfectado
DBO₅	NE ¹	NE ¹	20 mg/l DBO ₅ carbonácea	NE ¹	30 mg/l	5 mg/l	30 mg/l
SST	NE ¹	NE ¹	5 mg/l	NE ¹	NE ¹	NE ¹	30 mg/l
Turbidez	NE ¹	NE ¹	NE ¹	2 NTU (max)	NE ¹	3 NTU	2 NTU (Méd) 5 NTU (Max)
Coliformes	Fecal	Total	Fecal	Fecal	Fecal	Fecal	Total
	200/100 ml (Méd)	23/100 ml (Méd)	75% das amostras não detectáveis	2,2/100 ml (Méd)	200/100 ml (Méd)	20/100 ml (Méd)	23/100 ml (Méd)
	800/100 ml (Max)	240/100 ml (Max em 30 dias)	800/100 ml (Max)	23/100 ml (Max)	400/100 ml (Max)	75/100 ml (Max)	240/100 ml (Max)

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ NE – Não especificado pela lei do estado

Devido à baixa disponibilidade de água para abastecimento, em 1989 um decreto determinou o uso de água recuperada na Tunísia para irrigação na agricultura. Foi levada em consideração a proteção da saúde dos cultivadores e consumidores, e do meio ambiente. O monitoramento dos parâmetros físico-químicos e biológicos da água recuperada e da plantação irrigada foi feito da seguinte maneira: análise dos parâmetros físico-químicos uma vez ao mês, de

elementos traço a cada seis meses e ovos de helmintos a cada duas semanas. Em áreas onde a irrigação por aspersão foi usada, foram criadas áreas pulmão de segurança e a pastagem direta em campos irrigados por água recuperada foi proibida. O Quadro 2.15 mostra os padrões usados pela Tunísia para o reúso agrícola.

QUADRO 2.15 – PADRÕES PARA ÁGUA DE REÚSO NA IRRIGAÇÃO AGRÍCOLA NA TUNÍSIA

Parâmetros ¹	Concentração Máxima Permitida
pH	6,5 – 8,5
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	7.000
DQO	90
DBO ₅	30
Sólidos Suspensos	30
Cloro	2.000
Flúor	3,0
Hidrocarbonetos Halogenados	0,001
Arsênico	0,1
Boro	3,0
Cádmio	0,01
Cobalto	0,1
Cromo	0,1
Cobre	0,5
Ferro	5,0
Manganês	0,5
Mercúrio	0,001
Níquel	0,2
Chumbo	1,0
Selênio	0,05
Zinco	5,0
Parasitas Intestinais (média aritmética n.º de ovos por litro)	<1,0

FONTE: Adaptado de ANGELAKIS (1999)

¹ Todas as unidades em mg/L, a menos que esteja especificada de outra maneira

² Amostra composta 24h

³ Exceto com autorização especial

A WHO (2006), no volume dois de sua recente publicação de reúso de efluentes na agricultura, sugere formas de tratamento para redução de patógenos e suas concentrações de coliformes fecais para irrigação restrita e não restrita, como pode ser observado no Quadro 2.16. Esta mesma publicação também determina limites de concentração para diversos parâmetros do efluente, inclusive elementos traço com pode sem observado nos Quadros 2.17 e 2.18.

QUADRO 2.16 – MONITORAMENTO DO TRATAMENTO DE EFLUENTES (*E. COLI* NÚMEROS POR 100 ML DE EFLUENTE TRATADO) PARA DIVERSOS NÍVEIS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES NAS OPÇÕES A-G PARA USO NA AGRICULTURA

Tipo de irrigação	Opção para redução de patógenos	Redução de patógenos necessária por tratamento (unidade Log)	Verificação do nível de monitoramento (<i>E. Coli</i> por 100 mL)	Observações
Não restrita	A	4	$\leq 10^3$	Cultivo de raízes
	B	3	$\leq 10^4$	Cultivo de folhas
	C	4	$\leq 10^5$	Irrigação por gotejamento para cultivo de alto crescimento
	D	4	$\leq 10^3$	Irrigação por gotejamento para cultivo de baixo crescimento
	E	6 ou 7	$\leq 10^1$ ou 10^0	Níveis de verificação dependem das exigências da agência reguladora local ¹
Restrita	F	4	$\leq 10^4$	Agricultura com intensa mão de obra humana
	G	3	$\leq 10^5$	Agricultura altamente mecanizada
	H	0,5	$\leq 10^6$	Remoção de patógenos em tanque séptico

FONTE: Adaptado de WHO (2006)

¹ Por exemplo, para tratamento secundário, filtração e desinfecção: DBO₅ < 10 mg/L; Turbidez < 2 NTU; Cloro residual = 1,0 mg/L; pH entre 6-9 e coliformes fecais não detectáveis em 100 mL

A, B – Tratamento + Die-off + Lavagem do produto

C, D – Tratamento + Irrigação por gotejamento

E, F, G – Tratamento

H – Tratamento + Irrigação subsuperficial

QUADRO 2.17 – PADRÃO ESTABELECIDO PELA W.H.O. PARA A ÁGUA DE REÚSO NA IRRIGAÇÃO AGRÍCOLA

Parâmetro		Unidade	Grau de restrição no uso		
Símbolo/sigla	Nota		Nenhum	Pouco a moderado	Severo
Salinidade ¹	-	dS/m	< 0,7	0,7 – 3,0	> 3,0
SDT	-	mg/L	< 450	450 - 2000	> 2000
SST	-	mg/L	< 50	50 - 100	> 100
Na ⁺	Irrigação por aspersão	meq/L	< 3	> 3	
Na ⁺	Irrigação superficial	meq/L	< 3	3 - 9	> 9
Cl ⁻	Irrigação por aspersão	meq/L	< 3	> 3	
Cl ⁻	Irrigação superficial	meq/L	< 4	4 - 10	> 10
Cl ₂	Residual total	mg/L	< 1	1 - 5	> 5
HCO ₃ ⁻	-	mg/L	< 90	90 - 500	> 500
B	-	mg/L	< 0,7	0,7 – 3,0	> 3,0
H ₂ S	-	mg/L	< 0,5	0,5 – 2,0	> 2,0
Fe	Irrigação por gotejamento	mg/L	< 0,1	0,1 – 1,5	> 1,5
Mn	Irrigação por gotejamento	mg/L	< 0,1	0,1 – 1,5	> 1,5
Nitrogênio Total	-	mg/L	< 5	5 - 30	> 30
pH	-	-	Faixa usual entre 6,5 a 8,0		

FONTE: Adaptado de WHO (2006)

¹ Condutividade elétrica em deciSiemens por metro a 25°C

QUADRO 2.18 – LIMITES ESTABELECIDOS PELA W.H.O. PARA OS NÍVEIS DE ELEMENTOS TRAÇO NA ÁGUA DE REÚSO UTILIZADA NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA (continua)

Elemento	Concentração máxima recomendada (mg/L) ¹	Observações
Al – Alumínio	5,0	Pode produzir falta de produtividade em solos ácidos (pH < 5,5), mas em solos mais alcalinos (pH > 7,0) precipitará o íon e elimina qualquer toxicidade.
As – Arsênico	0,10	Toxicidade para extensa variedade de plantas, numa faixa de 12,0 mg/L para gramínea sudanesa a menos de 0,05 mg/L para arroz.
Be – Berílio	0,10	Toxicidade para extensa variedade de plantas, numa faixa de 5,0 mg/L para couve a menos de 0,5 mg/L para feijão.
Cd – Cádmio	0,01	Tóxico para feijão, beterraba e nabo à concentrações tão baixas quanto 0,1 mg/L em solução de nutrientes. Limites conservativos são recomendados devido seu potencial para acumulação nas plantas e no solo em concentrações que podem ser nocivas aos humanos.
Co – Cobalto	0,05	Toxicidade para tomate a 0,1 mg/L em solução de nutrientes. Tende a ser inerte em solos neutros e alcalinos.
Cr – Cromo	0,10	Não é geralmente conhecido como um elemento essencial ao crescimento. Limites conservativos são recomendados devido à falta de conhecimento de sua toxicidade em plantas.
Cu – Cobre ²	0,20	Tóxico para diversas plantas entre 0,1 e 1,0 mg/L em solução de nutrientes.
F – Fluoreto	1,0	Inerte em solos neutros e alcalinos.
Fe – Ferro ²	5,0	Não é tóxico para plantas em solo aerado, mas pode contribuir para a acidificação do solo e perda da disponibilidade essencial de fósforo e molibdênio. Aspersão aérea pode resultar em depósitos sobre plantas, equipamentos e edificações causando danos à aparência.
Li – Lítio	2,5	Tolerado pela maioria das culturas até 5 mg/L; mobilidade no solo. Tóxico para plantas cítricas à baixas concentrações (<0,075 mg/L). Atua de forma similar ao boro.
Mn – Manganês ²	0,20	Tóxico para diversas culturas de poucos décimos a poucos mg/L, mas usualmente apenas para solos ácidos.
Mo – Molibdênio	0,01	Não é tóxico para plantas em concentrações normais encontradas no solo e água. Pode ser tóxico para a criação animal se a pastagem cresce em solo com alta concentração disponível de molibdênio.
Ni – Níquel	0,20	Tóxico para diversas plantas entre 0,5 e 1,0 mg/L; A toxicidade é reduzida em pH neutro ou alcalino.
Pd – Chumbo	5,0	Pode reduzir o crescimento celular da planta em altas concentrações.
Se – Selênio	0,02	Tóxico para as plantas a uma concentração tão baixa quanto 0,025 mg/L, e tóxico para a criação animal se a pastagem cresce em solo com níveis relativamente altos de selênio adicionado. Elemento essencial para animais, porém em concentrações muito baixas.
V – Vanádio	0,10	Tóxico para várias plantas em concentrações relativamente baixas.

QUADRO 2.18 – LIMITES ESTABELECIDOS PELA W.H.O. PARA OS NÍVEIS DE ELEMENTOS TRAÇO NA ÁGUA DE REÚSO UTILIZADA NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA (conclusão)

Elemento	Concentração máxima recomendada (mg/L) ¹	Observações
Zn – Zinco ²	2,0	Tóxico para diversas plantas em uma vasta faixa de concentração; Toxicidade reduzida para pH > 6 e em solos de textura fina ou orgânica.

FONTE: Adaptado de WHO (2006)

¹ A concentração máxima é baseada na taxa de aplicação da água que está em conformidade com as boas práticas da irrigação (5.000 – 10.000 m³/ha por ano). Se a taxa de aplicação da água exceder estas quantidades, a concentração máxima deve ser decrescida adequadamente. Nenhum ajuste deve ser feito para taxas de aplicação menores que 10.000 m³/ha por ano.

² Ações sinérgicas do Cu e Zn e ações antagônicas do Fe e Mn tem sido relatadas em certas espécies de plantas, adsorção e tolerância de metais após irrigação com efluente. Se a água de irrigação contiver altas concentrações de Cu e Zn, a concentração de Cu no tecido da planta pode aumentar muito. Em plantas irrigadas com água contendo altas concentrações de Mn, a concentração de Mn tende a aumentar, e, conseqüentemente a concentração de Fe no tecido da planta pode reduzir consideravelmente. Geralmente a concentração de metais no tecido das plantas aumenta com a concentração da água de irrigação. A concentração nas raízes é usualmente mais alta que nas folhas.

No Brasil a Resolução do CONAMA n.º 357, capítulo 2, seção I, artigo quarto, determina que as águas de classe 1 podem ser destinadas à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película e a classe 2 é destinada à irrigação de hortaliças e plantas frutíferas. Também faz menção as águas de classe 3, que podem ser destinadas à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras.

De acordo com o artigo décimo quinto desta resolução aplicam-se às águas doces de classe 2 as condições e padrões da classe 1 apresentados no quadro 2.19, à exceção do seguinte:

I - não será permitida a presença de corantes provenientes de fontes antrópicas que não sejam removíveis por processo de coagulação, sedimentação e filtração convencionais;

II - coliformes termotolerantes: para uso de recreação de contato primário deverá ser obedecida a Resolução CONAMA no 274, de 29 de novembro de 2000. Para os demais usos, não deverá ser excedido um limite de 1.000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 6 (seis) amostras coletadas durante o período de um ano, com freqüência bimestral. A E. coli poderá ser determinada em substituição ao parâmetro coliformes termotolerantes de acordo com limites estabelecidos pelo órgão ambiental competente;

III - cor verdadeira: até 75 mg Pt/L;

IV - turbidez: até 100 UNT;

V - DBO₅ dias a 20°C até 5 mg/L O₂;

VI - OD, em qualquer amostra, não inferior a 5 mg/L O₂;

VII - clorofila a: até 30 µg/L;

VIII - densidade de cianobactérias: até 50000 cel/mL ou 5 mm³/L; e,
IX - fósforo total:

- a) até 0,030 mg/L, em ambientes lênticos; e,
- b) até 0,050 mg/L, em ambientes intermediários, com tempo de residência entre 2 e 40 dias, e tributários diretos de ambiente lêntico.

O artigo 16 desta resolução estabelece que as águas de classe 3 devam obedecer aos padrões estabelecidos e apresentados no Quadro 2.19, acrescentado das mesmas indicações apresentadas anteriormente para as águas de classe 2, além das seguintes ressalvas:

- a) coliformes termotolerantes: para o uso de recreação de contato secundário não deverá ser excedido um limite de 2500 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 6 amostras, coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral. Para dessedentação de animais criados confinados não deverá ser excedido o limite de 1000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 6 amostras, coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral. Para os demais usos, não deverá ser excedido um limite de 4000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 6 amostras coletadas durante o período de um ano, com periodicidade bimestral. A E. Coli poderá ser determinada em substituição ao parâmetro coliformes termotolerantes de acordo com limites estabelecidos pelo órgão ambiental competente;
- b) DBO₅ dias a 20°C até 10 mg/L O₂;
- c) OD, em qualquer amostra, não inferior a 4 mg/L O₂.

QUADRO 2.19 – TEORES MÁXIMOS PARA PARÂMETROS POTENCIALMENTE PREJUDICIAIS PARA ÁGUAS DE CLASSE 1, 2 E 3 DO CONAMA 357 (continua)

PARÂMETROS	TEOR MÁXIMO	
	CLASSE 1 (à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película). CLASSE 2 (à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas).	CLASSE 3 (à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras).
Clorofila α	10 $\mu\text{g/L}$	60 $\mu\text{g/L}$
Densidade de cianobactérias	20.000 cel/mL ou 2 mm^3/L	100.000 cel/mL ou 10 mm^3/L
Sólidos dissolvidos totais	500 mg/L	500 mg/L
PARÂMETROS INORGÂNICOS	Valor máximo	Valor máximo
Alumínio dissolvido	0,1 mg/L Al	0,2 mg/L Al
Antimônio	0,005mg/L Sb	(1)
Arsênio total	0,01 mg/L As	0,033 mg/L As
Bário total	0,7 mg/L Ba	1,0 mg/L Ba
Bérblio total	0,04 mg/L Be	0,1 mg/L Be
Boro total	0,5 mg/L B	0,75 mg/L B
Cádmio total	0,001 mg/L Cd	0,01 mg/L Cd
Chumbo total	0,01mg/L Pb	0,033 mg/L Pb
Cianeto livre	0,005 mg/L CN	0,022 mg/L CN
Cloreto total	250 mg/L Cl	250 mg/L Cl
Cloro residual total (combinado + livre)	0,01 mg/L Cl	(1)
Cobalto total	0,05 mg/L Co	0,2 mg/L Co
Cobre dissolvido	0,009 mg/L Cu	0,013 mg/L Cu
Cromo total	0,05 mg/L Cr	0,05 mg/L Cr
Ferro dissolvido	0,3 mg/L Fe	5,0 mg/L Fe
Fluoreto total	1,4 mg/L F	1,4 mg/L F
Fósforo total (ambiente lântico)	0,020 mg/L	0,05 mg/L P
Fósforo total (ambiente intermediário, com tempo de residência entre 2 e 40 dias, e tributários diretos de ambiente lântico)	0,025 mg/L P	0,075 mg/L P
Fósforo total (ambiente lótico e tributários de ambientes intermediários)	0,1 mg/L P	0,15 mg/L P
Lítio total	2,5 mg/L Li	2,5 mg/L Li
Manganês total	0,1 mg/L Mn	0,5 mg/L Mn
Mercurio total	0,0002 mg/L Hg	0,002 mg/L Hg
Níquel total	0,025 mg/L Ni	0,025 mg/L Ni
Nitrato	10,0 mg/L N	10,0 mg/L N
Nitrito	1,0 mg/L N	1,0 mg/L N

QUADRO 2.19 – TEORES MÁXIMOS PARA PARÂMETROS POTENCIALMENTE PREJUDICIAIS PARA ÁGUAS DE CLASSE 1, 2 E 3 DO CONAMA 357 (continuação)

PARÂMETROS	TEOR MÁXIMO	
	CLASSE 1 (à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvem ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película). CLASSE 2 (à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas).	CLASSE 3 (à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras).
Nitrogênio amoniacal total	3,7 mg/L N, para pH ≤ 7,5	13,3 mg/L N, para pH ≤ 7,5
	2,0 mg/L N, para 7,5 < pH ≤ 8,0	5,6 mg/L N, para 7,5 < pH ≤ 8,0
	1,0 mg/L N, para 8,0 < pH ≤ 8,5	2,2 mg/L N, para 8,0 < pH ≤ 8,5
	0,5 mg/L N, para pH > 8,5	1,0 mg/L N, para pH > 8,5
Prata total	0,01 mg/L Ag	0,05 mg/L Ag
Selênio total	0,01 mg/L Se	0,05 mg/L Se
Sulfato total	250 mg/L SO ₄	250 mg/L SO ₄
Sulfeto (H ₂ S não dissociado)	0,002 mg/L S	0,3 mg/L S
Urânio total	0,02 mg/L U	0,02 mg/L U
Vanádio total	0,1 mg/L V	0,1 mg/L V
Zinco total	0,18 mg/L Zn	5 mg/L Zn
PARÂMETROS ORGÂNICOS	Valor máximo	Valor máximo
Acrilamida	0,5 µg/L	(1)
Alacloro	20 µg/L	(1)
Aldrin + Dieldrin	0,005 µg/L	0,03 µg/L
Atrazina	2 µg/L	2 µg/L
Benzeno	0,005 mg/L	0,005 mg/L
Benzidina	0,001 µg/L	(1)
Benzo (a) antraceno	0,05 µg/L	(1)
Benzo (a) pireno	0,05 µg/L	0,7 µg/L
Benzo (b) fluoranteno	0,05 µg/L	(1)
Benzo (k) fluoranteno	0,05 µg/L	(1)
Carbaril	0,02 µg/L	70,0 µg/L
Clordano (cis + trans)	0,04 µg/L	0,3 µg/L
2-Clorofenol	0,1 µg/L	(1)
Criseno	0,05 µg/L	(1)
Demeton (Demeton-O + Demeton-S)	4,0 µg/L	14,0 µg/L
2,4-D	0,1 µg/L	30,0 µg/L
Dibenzo (a,h) antraceno	0,05 µg/L	(1)
1,2-Dicloroetano	0,01 mg/L	0,01 mg/L
1,1-Dicloroetano	0,003 mg/L	30 µg/L
2,4-Diclorofenol	0,3 µg/L	(1)
Diclorometano	0,02 mg/L	(1)
DDT (p,p'-DDT + p,p'-DDE + p,p'-DDD)	0,002 µg/L	1,0 µg/L
Dodecacloro pentaciclodecano	0,001 µg/L	0,001 µg/L
Endossulfan (α + β + sulfato)	0,056 µg/L	0,22 µg/L
Endrin	0,004 µg/L	0,2 µg/L

QUADRO 2.19 – TEORES MÁXIMOS PARA PARÂMETROS POTENCIALMENTE PREJUDICIAIS PARA ÁGUAS DE CLASSE 1, 2 E 3 DO CONAMA 357 (conclusão)

PARÂMETROS	TEOR MÁXIMO	
	CLASSE 1 (à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvem rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película). CLASSE 2 (à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas).	CLASSE 3 (à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras).
Estireno	0,02 mg/L	(1)
Etilbenzeno	90,0 µg/L	(1)
Fenóis totais (substâncias que reagem com 4-aminoantipirina)	0,003 mg/L C ₆ H ₅ OH	0,01 mg/L C ₆ H ₅ OH
Glifosato	65 µg/L	280 µg/L
Gution	0,005 µg/L	0,005 µg/L
Heptacloro epóxido + Heptacloro	0,01 µg/L	0,03 µg/L
Hexaclorobenzeno	0,0065 µg/L	(1)
Indeno (1,2,3-cd)pireno	0,05 µg/L	(1)
Lindano (g-HCH)	0,02 µg/L	2,0 µg/L
Malation	0,1 µg/L	100,0 µg/L
Metolacloro	10 µg/L	(1)
Metoxicloro	0,03 µg/L	20,0 µg/L
Paration	0,04 µg/L	35,0 µg/L
PCBs - Bifenilas policloradas	0,001 µg/L	0,001 µg/L
Pentaclorofenol	0,009 mg/L	0,009 mg/L
Simazina	2,0 µg/L	(1)
Substâncias tensoativas que reagem com o azul de metileno	0,5 mg/L LAS	0,5 mg/L LAS
2,4,5-T	2,0 µg/L	2,0 µg/L
Tetracloroeto de carbono	0,002 mg/L	0,003 mg/L
Tetracloroeteno	0,01 mg/L	0,01 mg/L
Tolueno	2,0 µg/L	(1)
Toxafeno	0,01 µg/L	0,21 µg/L
2,4,5-TP	10,0 µg/L	10,0 µg/L
Tributilestanho	0,063 µg/L TBT	2,0 µg/L TBT
Triclorobenzeno (1,2,3-TCB + 1,2,4-TCB)	0,02 mg/L	(1)
Tricloroeteno	0,03 mg/L	0,03 mg/L
2, 4, 6 - Triclorofenol	0,01 mg/L	0,01 mg/L
Trifluralina	0,2 µg/L	(1)
Xileno	300 µg/L	(1)

FONTE: Resolução CONAMA N.º 357 (2005)

(1) – Não especificado

2.2.2.3. Reúso planejado de água para fins recreacionais

Esta classificação é reservada ao reúso direto de água para abastecimento de corpos de água superficiais como lagos, reservatórios, e rios usados para fins

recreacionais, além de usos em paisagismo, como irrigação de jardins e parques públicos, lagos ornamentais e também na rega de campos esportivos. Segundo a US EPA (2004), o reúso não potável para fins recreacionais é subdividido em duas categorias: as de áreas com acesso controlado e não controlado.

2.2.2.3.1 Critérios para reúso recreacional

Em sua norma de procedimentos para o reúso de água, a US EPA sugere critérios e diretrizes para o reúso recreacional em lagos e reservatórios a países e localidades que não possuem legislação para este tipo de reúso (Quadro 2.20). Nota-se que neste quadro sugestivo, não há diferença de critério para os usos em corpos de água que propiciem contato acidental, como pesca e esportes aquáticos e contato corporal total, como mergulho e natação. Estes critérios e diretrizes para a prática do reúso recreacional são apresentados no quadro a seguir:

QUADRO 2.20 – CRITÉRIOS E DIRETIZES DA U.S. E.P.A. PARA REÚSO RECREACIONAL

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção²	Comentários
<i>Reúso recreacional em lagos e/ou reservatórios</i> Contato acidental (Ex.: pescaria e esportes aquáticos) e todo contato corporal permitido com água recuperada.	- Secundário; - Filtração; - Desinfecção.	- pH= 6-9; - ≤ 10 mg/L DBO; - ≤ 2 NTU ⁴ ; - Coliformes fecais não detectáveis em 100 mL ^{5, 6} ; - 1 mg/L Cl ₂ residual (mínimo) ³ .	- pH – semanal; - DBO – semanal; - Turbidez – contínua; - Coliformes – diário; - Cl ₂ residual – contínuo.	- Mínimo de 150 metros de distância de fontes de água potável se fundo não for impermeável.	- A descloração pode ser necessária para proteger espécies da fauna e flora; - A água recuperada não deve irritar a pele e olhos e deve estar limpa e sem cheiro; - A remoção de nutrientes pode ser necessária para prevenir o crescimento de algas nos reservatórios/lagos; - A adição de coagulante e/ou polímero antes da filtração pode ser necessária para chegar às recomendações de qualidade da água; - A água recuperada não deve conter níveis mensuráveis de patógenos viáveis; - A pesca de peixes em reservatórios/lagos pode ser consumida.

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ Salvo notações diferentes, a aplicação dos limites de qualidade recomendados para água recuperada é no ponto de descarte das instalações de tratamento

² Distâncias mínimas de proteção são recomendadas para proteger as fontes de água potável de contaminações e para proteger pessoas de riscos a saúde devido à exposição à água recuperada.

³ Tempo mínimo de contato: 30 minutos

⁴ Valor médio de 24h, não excedendo 5 NTU em nenhum estante. Se SST for usado no lugar da turbidez, o SST não deve exceder 5 mg/l

⁵ Baseado numa média de 7 dias (técnicas usadas: fermentação em tubos ou filtro membranas)

⁶ O número de coliformes fecais não devem exceder 14/100 mL em nenhuma amostra

Para os estados americanos existe diferenciação nos critérios, quando se faz ou não controle da área em que se aplica a água recuperada. Como no reúso urbano não controlado, o reúso recreacional não controlado envolve o uso de água recuperada onde a exposição pública é provável, com isso, deve-se proporcionar um alto grau de tratamento ao efluente. Para esta modalidade de reúso, apenas quatro estados americanos a possuem, de um universo de sete estados que normalmente têm legislação. No Quadro 2.21 são apresentados os critérios, diretrizes e tratamento para reúso recreacional em áreas não controladas.

QUADRO 2.21 – CRITÉRIOS, DIRETRIZES E TRATAMENTO DA ÁGUA RECUPERADA PARA REÚSO RECREACIONAL EM ÁREAS NÃO CONTROLADAS EM ALGUNS ESTADOS AMERICANOS

	Arizona	Califórnia	Flórida	Haváí	Nevada	Texas	Washington
Tratamento	NR ¹	Oxidado, coagulado, clarificado, filtrado e desinfectado	NR ¹	NR ¹	Secundário e desinfecção	NE ²	Oxidado, coagulado, filtrado e desinfectado
DBO₅	NR ¹	NE ²	NR ¹	NR ¹	30 mg/L	5 mg/L	30 mg/L
SST	NR ¹	NE ²	NR ¹	NR ¹	NE ²	NE ²	30 mg/L
Turbidez	NR ¹	2 NTU (Méd) 5 NTU (Max)	NR ¹	NR ¹	NE ²	3 NTU	2 NTU (Méd) 5 NTU (Max)
Coliformes	NR ¹	Total	NR ¹	NR ¹	Fecal	Fecal	Total
		2,2/100 mL (Méd)			2,2/100 mL (Méd)	20/100 mL (Méd)	2,2/100 mL (Méd)
		23/100 mL (Max em 30 dias)			23/100 mL (Max)	75/100 mL (Max)	23/100 mL (Max)

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ NR – Não regulamentado pelo estado

² NE – Não especificado pelas leis do estado

Para o caso de reúso recreacional em áreas controladas, onde a exposição pública tende a ser menor, a qualidade e o tratamento da água recuperada a ser usada são menores se comparada com áreas de acesso não controlado. Aqui, seis dos sete estados americanos possuem regulamentação. No Quadro 2.22 são apresentados os critérios, diretrizes e tratamento para reúso recreacional em áreas controladas.

BLUM (2003) cita em sua contribuição ao livro de MANCUSO e SANTOS (2003), que o reúso de águas para a criação de lagos artificiais exige um nível de qualidade adequado ao nível de contato humano esperado. A legislação brasileira especifica níveis de qualidade para águas superficiais utilizadas para recreação como classe 2 para contato primário e classe 3 para contato secundário. Este autor também cita que em critérios gerais a água não pode apresentar aspecto e cheiro

objetáveis e não deve conter teores de nutrientes, especialmente de fósforo, que levem ao crescimento explosivo de algas. Em relação à presença de microorganismos patogênicos e compostos químicos potencialmente tóxicos, BLUM (2003) também adverte que os teores admissíveis devem levar em conta o tipo de contato esperado. O Quadro 2.23 contém os padrões de qualidade recomendados para águas de uso recreacional de contato primário e secundário.

QUADRO 2.22 – CRITÉRIOS, DIRETRIZES E TRATAMENTO DA ÁGUA RECUPERADA PARA REÚSO RECREACIONAL EM ÁREAS CONTROLADAS EM ALGUNS ESTADOS AMERICANOS

	Arizona	Califórnia	Flórida	Havai	Nevada	Texas	Washington
Tratamento	Secundário, filtração e desinfecção	Secundário – 23, oxidado e desinfectado	NR ¹	Oxidado, filtrado e desinfectado	Secundário e desinfecção	NE ²	Oxidado e desinfectado
DBO₅	NE ²	NE ²	NR ¹	NE ²	30 mg/L	20 mg/L	30 mg/L
SST	NE ²	NE ²	NR ¹	NE ²	NE ²	NE ²	30 mg/L
Turbidez	2 NTU (Méd) 5 NTU (Max)	NE ²	NR ¹	2 NTU (max)	NE ²	NE ²	2 NTU (Méd) 5 NTU (Max)
Coliformes	Fecal	Total	NR ¹	Fecal	Fecal	Fecal	Total
	Não detectável (Méd)	2,2/100 mL (Méd)		2,2/100 mL (Méd)	200/100 mL (Méd)	200/100 mL (Méd)	2,2/100 mL (Méd)
	23/100 mL (Max)	23/100 mL (Max em 30 dias)		23/100 mL (Max)	23/100 mL (Max)	800/100 mL (Max)	23/100 mL (Max)

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ NR – Não regulamentado pelo estado

² NE – Não especificado pela lei do estado

QUADRO 2.23 – PADRÕES DE QUALIDADE DE ÁGUAS PARA FIM RECREACIONAL

Parâmetro	Unidade	Padrão/Conama	
		Contato primário	Contato secundário
Microorganismos aquáticos	-	Virtualmente ausente	
Coliformes fecais	NMP/100mL	200	-
Coliformes totais	NMP/100mL	-	100
DQO	mg O ₂ /L	30	60
Cor	-	Virtualmente ausente	
Transparência Secchi	M	1,2	-
Espumas e materiais flutuantes	-	Virtualmente ausente	
Odor	-	Virtualmente ausente	
Óleos	-	Virtualmente ausente	
pH	un.	6,5 a 8,3	
Fosfato	mg/L P	0,2	-
Sólidos sedimentáveis	-	Virtualmente ausente	
Sólidos em suspensão	mg/L	5	-
Oxigênio Dissolvido	mg/L O ₂	-	Presente
Temperatura	°C	15-35	-

FONTE: MANCUSO e SANTOS (2003)

2.2.2.4. Reúso planejado de água no meio ambiente

Esta classificação, segundo a US EPA (2004), está relacionada com o reúso de efluente tratado para recuperação e embelezamento de ambientes como *wetlands*, pântanos, habitat de animais selvagens e aumento ou manutenção de vazões de cursos de água.

No caso da aplicação de água recuperada para criação artificial de *wetlands* ou o melhoria de *wetlands* naturais, o trabalho se torna ainda mais importante, pois estes sistemas exercem uma função ambiental relevante na preservação de espécies aquáticas, na atenuação de fluxos hídricos e na melhoria da qualidade da água (MANCUSO e SANTOS 2003).

O reúso de efluentes tratados como manutenção de vazões em corpos de água, muitas vezes é citado como um conceito separado de forma de reúso, como é possível constatar em MANCUSO e SANTOS (2003). Este autor apresenta esta modalidade com o objetivo de manter uma dada vazão num curso de água para diluir as cargas poluidoras a elas aportadas, além de também possibilitar a manutenção de vazões mínimas em épocas de estiagem.

2.2.2.4.1 Critérios para reúso água no meio ambiente

No capítulo quatro da sua norma de procedimentos para reúso de água, a US EPA (2004), sugere diretrizes para o reúso de água recuperada em *wetlands*, pântanos, habitat de animais selvagens e aumento de vazão. O Quadro 2.24 apresenta estes critérios e diretrizes para a prática do reúso de água no meio ambiente.

Nota-se que as diretrizes sugeridas pela EPA a países e localidades que não possuem regulamentação, é menos exigente que nos estados da Flórida e Washington quando o assunto é reúso em *wetlands*. Estes dois estados são os únicos nos Estados Unidos que possuem regulamentação relativa ao uso de água recuperada para criação artificial ou melhoria de *wetlands* naturais. No Quadro 2.25 são apresentados os critérios de qualidade na Flórida e Washington para a água recuperada quando usada em ambientes como *wetlands*.

QUADRO 2.24 – CRITÉRIOS E DIRETIZES DA U.S. E.P.A. PARA REÚSO NO MEIO AMBIENTE

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada ¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção ²	Comentários
Reúso no meio ambiente Wetlands, pântanos, habitat de animais selvagens, aumento de vazões.	- Variável; - Secundário e desinfecção (mínimo).	Variável mas não exceder: - ≤ 30 mg/L DBO; - ≤ 30 mg/L SST; - ≤ 200 Coliformes fecais em 100 mL ^{3,4} ;	- DBO – semanal; - SST – diário; - Coliformes – diário; - Cl ₂ residual – contínuo.		- A descloração pode ser necessária para proteger espécies da fauna e flora; - Possíveis efeitos nas águas subterrâneas devem ser avaliados; - Os requisitos da qualidade da água receptora podem exigir tratamento adicional; - A temperatura da água recuperada não deve afetar prejudicialmente o ecossistema;

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ Salvo notações diferentes, a aplicação dos limites de qualidade recomendados para água recuperada é no ponto de descarte das instalações de tratamento

² Distâncias mínimas de proteção são recomendadas para proteger as fontes de água potável de contaminações e para proteger pessoas de riscos a saúde devido à exposição à água recuperada

³ Baseado numa média de 7 dias (técnicas usadas: fermentação em tubos ou filtro membranas)

⁴ O número de coliformes fecais não devem exceder 800/100 mL em nenhuma amostra. Algumas lagoas de estabilização podem estar aptas a atingir estes limites de coliformes sem desinfecção

QUADRO 2.25 – CRITÉRIOS, DIRETRIZES E TRATAMENTO DA ÁGUA RECUPERADA PARA REÚSO NO MEIO AMBIENTE NOS ESTADOS DA FLÓRIDA E WASHINGTON - WETLANDS

	Flórida ¹	Washington
Tratamento	Tratamento avançado	Oxidado, coagulado e desinfectado.
DBO ₅	5mg/L de DBO ₅ carbonácea	20mg/L
SST	5mg/L	20mg/L
Coliformes	NE ²	Fecal 2,2/100 mL (Méd) 23/100 mL (Max)
Amônia total	2 mg/L	Não exceder aos padrões crônicos para água doce
Fósforo total	1 mg/L	1 mg/L

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ As exigências na Flórida são para descarte da água recuperada em *wetlands* receptores

² NE – Não especificado pela lei do estado

2.2.2.5. Reúso planejado de água para fins industriais

Segundo diversos especialistas da área, as principais aplicações do reúso de água em uma indústria, objeto deste trabalho, podem ser observadas no Quadro 2.26. Estas são as atividades que mais consomem água em uma indústria e cujos padrões de qualidade não são muito exigentes, o que não impede que o reúso possa ser feito em qualquer outra atividade – desde que as características da água a ser utilizada atendam aos requisitos de qualidade exigidos (MIERZWA, 2005).

QUADRO 2.26 – PRINCIPAIS APLICAÇÕES DE REÚSO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA

Referência	Aplicação
Asano, 1991	Refrigeração Alimentação de caldeira Água de processo Construção pesada
Crook, 1996	Todas citadas em Asano, 1991 Lavador de Gases
Hespanhol, 1997	Todas citadas em Asano, 1991 Lavagem de pisos e peças Irrigação de áreas verdes
Beeckman, 1998	Todas citadas em Asano, 1991
Mujeriego e Asano, 1999	Todas citadas em Asano, 1991

FONTES: MIERZWA (2005)

HESPANHOL (2003) cita que o reúso para fins industriais pode ser visualizado por diferentes aspectos, conforme as possibilidades existentes no contexto interno ou externo das indústrias. O autor classifica o reúso industrial nas seguintes modalidades: reúso macroexterno, macrointerno e reúso interno específico ou reciclagem.

MIERZWA (2005) em seu livro classifica o reúso industrial de forma mais simplificada sugerindo apenas as modalidades macroexterna e macrointerna, incorporando o reúso interno ou reciclagem dentro da modalidade macrointerna.

A seguir as três possibilidades de reúso possíveis para as indústrias em geral.

2.2.2.5.1 Reúso macroexterno

O reúso macroexterno é definido como o reúso de efluentes proveniente de estações de tratamento administradas por concessionárias municipais, estaduais ou ainda de outras indústrias. Para este caso a indústria deve estudar técnica e financeiramente a viabilização de um sistema de tratamento adicional, necessário para atender a novos padrões de qualidade, mais os de adução e distribuição do efluente.

Geralmente, o sistema é viável se existir uma concentração razoável de indústrias que se associem ao programa de reúso, em um raio de aproximadamente cinco quilômetros no entorno da estação de tratamento e recuperação para reúso (MANCUSO e SANTOS, 2003).

2.2.2.5.2 Reúso específico

O reúso específico consiste em efetuar a reciclagem de efluente de quaisquer processos industriais, nos próprios processos nos quais são gerados, ou em outros processos que se desenvolvem em seqüência e que suportam qualidade compatível com o efluente em consideração (MANCUSO e SANTOS, 2003). A prática do reúso específico pode ser implantada de duas maneiras distintas (MIERZWA, 2002):

- Reúso em cascata: neste caso, o efluente originado por um determinado processo é diretamente utilizado em um processo subsequente, pois suas características são compatíveis com os padrões de qualidade da água utilizada. Este tipo de reúso é conhecido como reúso em cascata. Apesar desta modalidade de reúso parecer simples, em certos casos o efluente do processo anterior não atinge a qualidade do processo seguinte, sendo necessário utilizar os métodos de reúso parcial do efluente e da mistura do efluente com água de abastecimento público.
- Reúso de efluentes tratados: é o tipo de reúso mais discutido atualmente e consiste na utilização de efluentes já submetidos a um processo de tratamento. Neste caso a escolha do processo de tratamento em que o efluente será submetido, depende da qualidade exigida pelo local onde a água recuperada será utilizada.

São considerados exemplos típicos de reúso específico as operações de pintura em indústrias automobilísticas e de eletrodomésticos, onde as águas de lavagem que ocorrem sucessivamente, oriundas de decapagem, desengorduramento, fosfatização, etc., podem após tratamento serem recicladas no próprio processo de lavagem.

2.2.2.5.3 Problemas comuns na qualidade da água em sistemas de torres de resfriamento

De acordo com METCALF & EDDY (2003), normalmente são encontrados quatro tipos de problemas relacionados à qualidade da água em operações de torres de resfriamento. São eles as incrustações, a corrosão metálica, o crescimento biológico e a formação de *fouling* em trocadores de calor e condensadores. Ambas, água doce e água recuperada contém constituintes que podem causar estes

problemas, mas suas concentrações em águas recuperadas e efluentes são muito maiores. Estes quatro problemas são abordados a seguir de forma mais aprofundada.

- **Incrustações:** As incrustações estão relacionadas à formação de depósitos salinos devido a precipitações de sais quando estes atingem concentrações tais que ultrapassam o limite da solubilidade. Estas incrustações estão presentes em superfícies quentes as quais reduzem a eficiência dos trocadores de calor. As incrustações derivadas do elemento químico cálcio (carbonato de cálcio, sulfato de cálcio e fosfato de cálcio) são a principal causa dos problemas de incrustações em torres de resfriamento. O magnésio em forma de carbonato e fosfato também pode acarretar problemas. Depósitos de sílica são particularmente difíceis de remover das superfícies de trocadores de calor, no entanto, a maioria das águas residuárias contém quantidades relativamente pequenas de sílica. A redução do potencial incrustante de efluentes é alcançada controlando a formação de fosfato de cálcio que é o primeiro sal de cálcio a precipitar. O tratamento é normalmente realizado através de precipitação do fosfato. A troca iônica é outra tecnologia usada para reduzir a formação de incrustações de cálcio e magnésio. Mas esta técnica é comparativamente cara, limitando seu uso (METCALF & EDDY 2003).
- **Corrosão metálica:** METCALF & EDDY (2003), cita que em sistemas de refrigeração, a corrosão metálica pode ocorrer quando é criado um potencial elétrico entre superfícies metálicas diferentes. A célula de corrosão consiste em um anodo, onde ocorre a oxidação do metal, e um cátodo, onde acontece a redução de outro metal. A qualidade da água afeta de forma muito grande a corrosão metálica. Contaminantes como sólidos dissolvidos totais – SDT aumentam a condutividade elétrica da solução e, através disso, acelera as reações de corrosão. Oxigênio dissolvido e certos metais como manganês, ferro e alumínio promovem corrosão através de seus relativamente altos potenciais de oxidação. O potencial de corrosão de águas de refrigeração pode ser controlado através de inibidores químicos de corrosão. Deve-se levar em consideração que, os critérios para o uso de química no controle de

corrosão em águas recuperadas são muito maiores do que em água doce, porque a concentração de SDT é de duas a cinco vezes maior em efluentes.

- Crescimento biológico: O ambiente morno e úmido existente dentro das torres de resfriamento proporciona um ambiente ideal para promover o crescimento biológico. Nutrientes orgânicos, como o nitrogênio e o fósforo, encontrados em efluentes favorecem o crescimento de microrganismos que podem se depositar em superfícies de trocadores de calor inibindo sua eficiência e o fluxo de água. Outro problema relacionado à presença de microrganismos na água de resfriamento é que certas espécies podem criar subprodutos corrosivos durante sua fase de crescimento. O controle do crescimento biológico pode ser feito através da adição de biocidas, ácido para o controle do pH e inibidores de incrustações e materiais biológicos. Outro ponto que deve ser levado em consideração quando se usa água recuperada para resfriamento é a proteção da saúde de trabalhadores envolvidos com estes equipamentos e da vizinhança próxima às instalações. Normalmente os critérios utilizados para a água de reúso são estudados caso a caso, apesar destes critérios serem semelhantes aos usados em água de reúso para irrigação de culturas comestíveis (METCALF & EDDY 2003).
- Formação de *fouling*: O *fouling* refere-se ao processo de acúmulo e crescimento de depósitos orgânicos ou inorgânicos em diversos tipos de sistemas de torres de resfriamento com recirculação. Estes depósitos são crescimentos biológicos, de sólidos suspensos, de lodo, de produtos de corrosão e elementos inorgânicos. O resultado destes acúmulos é a inibição da transferência de calor em trocadores de calor. O controle do *fouling* é alcançado através da adição de dispersantes químicos que impedem com que as partículas se agreguem e conseqüentemente se depositem. A coagulação química e os processos de filtração requeridos para remoção de fósforo são efetivos na redução da concentração de contaminantes que contribuem para a concentração de *fouling* (METCALF & EDDY 2003).

2.2.2.5.4 Critérios para reúso industrial

A US EPA (2004), no capítulo quarto do seu guia de reúso de água, sugere diretrizes para o reúso industrial em países e localidades que não possuem

legislação definida. O Quadro 2.27 apresenta estes critérios, diretrizes e tratamento para a prática do reúso industrial.

QUADRO 2.27 – CRITÉRIOS E DIRETIZES DA U.S. E.P.A. PARA ÁGUA DE REÚSO INDUSTRIAL

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção²	Comentários
<i>Reúso Industrial</i> Resfriamento em única passagem (circuito aberto)	- Secundário; - Desinfecção.	- pH= 6-9; - ≤ 30mg/L DBO; - ≤ 30 mg/L SST; - ≤ 200 Coliformes fecais em 100 mL ^{4,5} ; - 1mg/L Cl ₂ residual (mínimo) ³ .	- pH – semanal; - DBO – semanal; - SST – diário; - Coliformes – diário; - Cl ₂ residual – contínuo.	- 90 metros de áreas acessíveis ao público.	- O vapor/spray levado pelo vento não deve alcançar áreas acessíveis aos trabalhadores e ao público.
<i>Reúso Industrial</i> Recirculação em torres de resfriamento.	- Secundário; - Desinfecção (coagulação química e filtração podem ser necessárias).	- Variável, dependendo do número de recirculações pH= 6-9; - ≤ 30 mg/L DBO; - ≤ 30 mg/L SST; - ≤ 200 Coliformes fecais em 100 mL ^{4,5} ; - 1 mg/L Cl ₂ residual (mínimo) ³ .	- pH – semanal; - DBO – semanal; - SST – diário; - Coliformes – diário; - Cl ₂ residual – contínuo.	- 90 metros de áreas acessíveis ao público. Pode ser reduzido ou eliminado se for alcançado um alto grau de desinfecção.	- O vapor/spray levado pelo vento não deve alcançar áreas acessíveis aos trabalhadores e ao público; - Tratamento adicional é habitualmente empregado por usuários para prevenir incrustações, corrosão, atividade biológica, entupimento e espuma.
Outros usos industriais	Depende das especificações locais de cada usuário				

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ Salvo notações diferentes, a aplicação dos limites de qualidade recomendados para água recuperada é no ponto de descarte das instalações de tratamento

² Distâncias mínimas de proteção são recomendadas para proteger as fontes de água potável de contaminações e para proteger pessoas de riscos a saúde devido à exposição à água recuperada

³ Tempo mínimo de contato: 30 minutos

⁴ Baseado numa média de 7 dias (técnicas usadas: fermentação em tubos ou filtro membranas)

⁵ O número de coliformes fecais não devem exceder 800/100mL em nenhuma amostra. Algumas lagoas de estabilização podem estar aptas a atingir estes limites de coliformes sem desinfecção

Para o caso de reúso industrial, cinco dos sete estados americanos que detêm regulamentação mais completa possuem diretrizes para este caso. Estas diretrizes de qualidade e tratamento para a água recuperada variam nos estados baseado no uso final desta água e no potencial de exposição. Por exemplo, na Califórnia há diferentes critérios para o uso de água recuperada como água de refrigeração, baseado se há ou não criação de névoa durante o processo. Se houver

criação de névoa no tratamento, é requisitada a oxidação, coagulação, filtração e desinfecção e o limite de coliformes deverá ser de 2,2 NMP/100 mL na média semanal. Por outro lado, se a névoa não for criada, apenas oxidação e desinfecção são necessárias e o limite de coliformes deverá ser de 23 NMP/100 mL na média semanal (US EPA, 2004). No Quadro 2.28 são apresentados os critérios, diretrizes e tratamento para reúso industrial.

QUADRO 2.28 – CRITÉRIOS, DIRETRIZES E TRATAMENTO DA ÁGUA RECUPERADA PARA REÚSO INDUSTRIAL EM ALGUNS ESTADOS AMERICANOS

	Arizona	Califórnia	Flórida	Havaí	Nevada	Texas	Washington
Tratamento	NR ¹	Oxidado e desinfectado	Secundário e desinfecção básica	Oxidação e desinfecção	NR ¹	NE ²	Oxidado e desinfectado
DBO₅	NR ¹	NE ²	20 mg/L	NE ²	NR ¹	20 mg/l	NE ²
SST	NR ¹	NE ²	20 mg/L	NE ²	NR ¹	---	NE ²
Turbidez	NR ¹	NE ²	NE ²	NE ²	NR ¹	3 NTU	NE ²
Coliformes	NR ¹	Total	Fecal	Fecal	NR ¹	Fecal	Total
		23/100 mL (Méd)	200/100 mL (Méd)	23/100 mL (Méd)		200/100 ml (Méd)	23/100 mL (Méd)
		240/100 mL (Max em 30 dias)	800/100 mL (Max)	200/100 mL (Max)		800/100 ml (Max)	240/100 mL (Max)

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ NR – Não regulamentado pelo estado

² NE – Não especificado pela lei do estado

Outra forma apresentada para a apresentação de critérios para a qualidade da água de reúso é em virtude da sua aplicação e do seu grau de qualidade. Assim, a água pode ser enquadrada em uma das quatro categorias adaptadas da classificação de HIGGINS (1989), com base nas características das águas superficiais de alguns rios da Região Sudeste (ANEEL, 2000), conforme Quadro 2.29:

QUADRO 2.29 – CATEGORIAS DE ÁGUA DE ACORDO COM SUA QUALIDADE

Grau de Qualidade	Parâmetros			
	SDT (mg/L) ¹	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	Dureza (mg/L) ²
Tipo I: água ultra pura.	< 10	< 1	0	0
Tipo II: água de processo de alta qualidade.	10 – 60	0 – 10	0	< 30
Tipo III: água tratada	20 – 60	0 – 10	0 – 10	30 – 75
Tipo IV: água bruta ou reciclada	60 – 800	10 – 150	10 – 100	–

FONTE: MIERZWA (2005)

¹ Valores baseados nos dados fornecidos pela ANEEL

² Valores baseados nos dados fornecidos pela ANEEL e pela classificação da água em função da dureza

No Quadro 2.30 a US EPA (2004) apresenta alguns critérios de qualidade para a água recuperada para as cidades de Orlando e Tampa na Florida e Los Angeles e San Francisco na Califórnia no intuito de reduzir problemas como corrosão, crescimento biológico e incrustações.

QUADRO 2.30 – REQUISITOS PRECONIZADOS PELO DEPARTAMENTO DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DA FLÓRIDA E CALIFORNIA PARA QUALIDADE DA ÁGUA EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO

Constituintes da Água	Orlando	Tampa	Los Angeles	San Francisco
Condutividade	1200 – 1800	600 – 1500	2000 – 2700	800 – 1200
Dureza (CaCO ₃)	180 – 200	100 – 120	260 – 450	50 – 180
Alcalinidade Total	150 – 200	60 – 100	140 – 280	30 – 120
Cloretos	20 – 40	30 – 80	250 – 350	40 – 200
Fosfatos	18 – 25	10 – 20	300 – 400	20 – 70
Amônia	10 – 15	5 – 15	4 – 20	2 – 8
Sólidos Suspensos	3 – 5	3 – 5	10 – 45	2 – 10

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

A US EPA (2004) também especifica requisitos para a qualidade da água recuperada para reuso em diversos processos industriais como os apresentados no Quadro 2.31. No Quadro 2.32 são apresentados requisitos de qualidade de água para alguns tipos de processos envolvendo a produção de polpa e papel na cidade de Nova York.

QUADRO 2.31 – REQUISITOS PARA QUALIDADE DA ÁGUA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

Parâmetro ¹	Papel e Celulose			Química	Petro & Carvão	Têxteis		Cimento
	Polpa Mecânica	Polpa Química Parda	Polpa Química Branqueada			Sizing Suspension	Lavagem, branqueamento e tintura	
Cu	-	-	-	-	0,05	0,01	-	-
Fé	0,3	1,0	0,05	0,1	1,0	0,3	0,1	2,5
Mn	0,1	0,5	0,05	0,1	-	0,05	0,01	0,5
Ca	-	20	20	68	75	-	-	-
Mg	-	12	12	19	30	-	-	-
Cl	1000	200	200	500	300	-	-	250
HCO ₃	-	-	-	128	-	-	-	-
NO ₃	-	-	-	5	-	-	-	-
SO ₄	-	-	-	100	-	-	-	250
SiO ₂	-	50	50	50	-	-	-	35
Dureza	-	100	100	250	350	25	25	-
Alcalinidade	-	-	-	125	-	-	-	400
SDT	-	-	-	1000	1000	100	100	600
SST	-	10	10	5	10	5	5	500
Cor	30	30	10	20	-	5	5	-
pH	6 - 10	6 - 10	6 - 10	6,2-8,3	6 - 9	-	-	6,5-8,5

FONTE: Adanski *et al.*, 2000. Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ Todos os valores são em mg/L exceto os parâmetros cor e pH

QUADRO 2.32 – REQUISITOS PARA QUALIDADE DA ÁGUA PARA PROCESSOS INDUSTRIAIS ENVOLVENDO POLPA E PAPEL

Parâmetro ¹	Polpa Mecânica ²	Polpa Química Parda	Polpa Química Branqueada
Ferro	0,3	1,0	0,1
Manganês	0,1	0,5	0,05
Cálcio	-	20	20
Magnésio	-	12	12
Cloro	1000	200	200
Dióxido de Silício	-	50	50
Dureza	-	100	100
SST	-	10	10
Cor	30	30	10
pH	6 - 10	6 - 10	6 - 10

FONTE: Water Pollution Control Federation, 1989. Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ Todos os valores são em mg/L exceto o parâmetro cor e pH

² Papel (como o de jornal) fabricado a partir de madeira bruta que não foi processada

MIERZWA (2005), cita que muitas aplicações exigem que um número maior de parâmetros sejam apresentados e atendidos, de modo que os riscos ao processo, produto ou sistema diminuam. O Quadro 2.33 apresenta uma seleção de diversos requisitos a serem respeitados pela água de processo em uma variada gama de setores da indústria.

QUADRO 2.33 – REQUISITOS DE QUALIDADE DA ÁGUA DE USO INDUSTRIAL. PARÂMETROS EM MG/L, EXCETO QUANDO ESPECIFICADA A UNIDADE (continua)

Indústria e Processo	Cor (unid. de cor)	Alcalinidade (CaCO ₃)	Cloreto	Dureza (CaCO ₃)	Ferro	Manganês	Nitrato	pH (unidades)	Sulfato	SDT	Sólidos Suspensos	Sílica	Cálcio	Magnésio	Bicarbonato
Têxtil															
Engomagem	5	-	-	25	0,3	0,05	-	6,5-10,0	-	100	5	-	-	-	-
Lavagem	5	-	-	25	0,1	0,01	-	3,0-10,5	-	100	5	-	-	-	-
Branqueamento	5	-	-	25	0,1	0,01	-	2,0-10,5	-	100	5	-	-	-	-
Tingimento	5	-	-	25	0,1	0,01	-	3,5-10,0	-	100	5	-	-	-	-
Papel e Celulose															
Processo mecânico	30	-	10 ³	-	0,3	0,1	-	6,0-10	-	-	-	-	-	-	-
Processo químico não branqueado	30	-	200	100	1	0,5	-	6,0-10,0	-	-	10	50	20	12	-
Processo químico branqueado	10	-	200	100	0,1	0,05	-	6,0-10,0	-	-	10	50	20	12	-

QUADRO 2.33 – REQUISITOS DE QUALIDADE DA ÁGUA DE USO INDUSTRIAL. PARÂMETROS EM MG/L, EXCETO QUANDO ESPECIFICADA A UNIDADE (conclusão)

Indústria e Processo	Cor (unid. de cor)	Alcalinidade (CaCO ₃)	Cloreto	Dureza (CaCO ₃)	Ferro	Manganês	Nitrato	pH (unidades)	Sulfato	SDT	Sólidos Suspensos	Sílica	Cálcio	Magnésio	Bicarbonato
Produtos químicos															
Cloro e álcali	10	80	-	140	0,1	0,1	-	6,0-8,5	-	-	10	-	40	80	100
Carvão e alcatrão	5	50	30	180	0,1	0,1	-	6,5-8,3	200	400	5	-	50	14	60
Compostos orgânicos	5	125	25	170	0,1	0,1	-	6,5-8,7	75	250	5	-	50	12	128
Compostos inorgânicos	5	70	30	250	0,1	0,1	-	6,5-7,5	90	425	5	-	60	25	210
Plásticos e resinas	2	1	0	0	0,005	0,005	0	7,5-8,5	0	1	2	0,02	0	0	0,1
Borracha sintética	2	2	0	0	0,005	0,005	0	7,5-8,5	0	2	2	0,05	0	0	0,5
Produtos farmacêuticos	2	2	0	0	0,005	0,005	0	7,5-8,5	0	2	2	0,02	0	0	0,5
Sabão e detergentes	5	50	40	130	0,1	0,1	-	-	150	300	10	-	30	12	60
Tintas	5	100	30	150	0,1	0,1	-	6,5	125	270	10	-	37	15	125
Madeira e resinas	200	200	500	900	0,3	0,2	5	6,5-8,0	100	10 ³	30	50	100	50	250
Fertilizantes	10	175	50	250	0,2	0,2	5	6,5-8,5	150	300	10	25	40	20	210
Explosivos	8	100	30	150	0,1	0,1	2	6,8	150	200	5	20	20	10	120
Petróleo	-	-	300	350	1	-	-	6,0-9,0	-	10 ³	10	-	75	30	-
Ferro e aço															
Laminação a quente	-	-	-	-	-	-	-	5,0-9,0	-	-	-	-	-	-	-
Laminação a frio	-	-	-	-	-	-	-	5,0-9,0	-	-	10	-	-	-	-
Diversas															
Frutas e vegetais enlatados	5	250	250	250	0,2	0,2	10	6,5-8,5	250	500	10	50	100	-	-
Refrigerantes	10	85	-	-	0,3	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Curtimento de Couro	5	-	250	150	50	-	-	6,0-8,0	-	-	-	-	60	-	-
Cimento	-	400	250	-	25	0,5	0	6,5-8,5	250	600	500	35	-	-	-

FONTE: NEMEROW e DASGUPTA (1991), citado por MIERZWA (2005)

METCALF & EDDY (2003) apresentam algumas características referidas para reutilização de água em alimentação de aquecedores e caldeiras e torres de resfriamento conforme Quadros 2.34 e 2.35 respectivamente.

QUADRO 2.34 – CRITÉRIOS DE QUALIDADE REQUERIDA ANTES DA ADIÇÃO DE SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS PARA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DE AQUECEDORES E CALDEIRAS

Características	Industrial			Utilidades Elétricas
	Baixa Pressão	Pressão Intermediária	Alta Pressão	
Sílica (SiO ₂)	30 mg/L	10 mg/L	0,7 mg/L	0,01 mg/L
Alumínio (Al)	5 mg/L	0,1 mg/L	0,01 mg/L	0,01 mg/L
Ferro (Fe)	1 mg/L	0,3 mg/L	0,05 mg/L	0,01 mg/L
Manganês (Mn)	0,3 mg/L	0,1 mg/L	0,01 mg/L	0,01 mg/L
Cálcio (Ca)	(1)	0,4 mg/L	0,01 mg/L	0,01 mg/L
Magnésio (Mg)	(1)	0,25 mg/L	0,01 mg/L	0,01 mg/L
Amônia (NH ₄)	0,1 mg/L	0,1 mg/L	0,1 mg/L	0,07 mg/L
Bicarbonato (HCO ₃)	170 mg/L	120 mg/L	48 mg/L	0,5 mg/L
Sulfato (SO ₄)	(1)	(1)	(1)	(1)
Cloreto (Cl)	(1)	(1)	(1)	(1), (2)
Sólidos Dissolvidos	700 mg/L	500 mg/L	200 mg/L	0,5 mg/L
Cobre (Cu)	0,5 mg/L	0,05 mg/L	0,05 mg/L	0,01 mg/L
Zinco (Zn)	(1)	0,01 mg/L	0,01 mg/L	0,01 mg/L
Dureza (CaCO ₃)	350 mg/L	1 mg/L	0,07 mg/L	0,07 mg/L
Alcalinidade (CaCO ₃)	350 mg/L	100 mg/L	40 mg/L	1 mg/L
pH	7,0 – 10,0	8,2 – 10,0	8,2 – 9,0	8,8 – 9,4
Orgânicos				
- Azul de Metileno	1 mg/L	1 mg/L	0,5 mg/L	0,1 mg/L
- Tetracloreto de Carbono	1 mg/L	1 mg/L	0,5 mg/L	(1), (3)
DQO	5 mg/L	5 mg/L	1 mg/L	1 mg/L
Ácido Sulfídrico (H ₂ S)	(1)	(1)	(1)	(1)
Oxigênio Dissolvido (O ₂)	2,5 mg/L	0,007 mg/L	0,007 mg/L	0,007 mg/L
Temperatura	(1)	(1)	(1)	(1)
Sólidos Suspensos	10 mg/L	5 mg/L	0,5 mg/L	0,05 mg/L

FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003, p 1419 e 1420)

(1) Aceito como recebido; nunca houve problemas com as concentrações ou valores encontrados

(2) Controlado pelo tratamento de outros constituintes

(3) Ausente, não detectado por testes

No Brasil, o pólo petroquímico de Mauá, na grande São Paulo, faz exigências para a qualidade da água de reúso em sistemas de resfriamento conforme o Quadro 2.36 (MANCUSO, 2000).

QUADRO 2.35 – CRITÉRIOS DE QUALIDADE REQUERIDA PARA ÁGUA DE TORRE DE RESFRIAMENTO

Características	Sem Recirculação		Com Recirculação	
	Água Doce	Água Salobra ¹	Água Doce	Água Salobra ¹
Sílica (SiO ₂)	50 mg/L	25 mg/L	50 mg/L	25 mg/L
Alumínio (Al)	(2)	(2)	0,1 mg/L	0,1 mg/L
Ferro (Fe)	(2)	(2)	0,5 mg/L	0,5 mg/L
Manganês (Mn)	(2)	(2)	0,5 mg/L	0,02 mg/L
Cálcio (Ca)	200 mg/L	420 mg/L	50 mg/L	420 mg/L
Magnésio (Mg)	(2)	(2)	(2)	(2)
Amônia (NH ₄)	(2)	(2)	(2)	(2)
Bicarbonato (HCO ₃)	600 mg/L	140 mg/L	24 mg/L	140 mg/L
Sulfato (SO ₄)	680 mg/L	2.700 mg/L	200 mg/L	2.700 mg/L
Cloreto (Cl)	600 mg/L	19.000 mg/L	500 mg/L	19.000 mg/L
Sólidos Dissolvidos	1000 mg/L	35.000 mg/L	500 mg/L	35.000 mg/L
Cobre (Cu)	(2)	(2)	(2)	(2)
Zinco (Zn)	(2)	(2)	(2)	(2)
Dureza (CaCO ₃)	850 mg/L	6.250 mg/L	650 mg/L	6.250 mg/L
Alcalinidade (CaCO ₃)	500 mg/L	115 mg/L	350 mg/L	115 mg/L
pH	5,0 – 8,3	6,0 – 8,3	(2)	(2)
Orgânicos				
- Azul de Metileno	(2)	(2)	1 mg/L	1 mg/L
- Tetracloreto de Carbono	(3)	(3)	1 mg/L	2 mg/L
DQO	75 mg/L	75 mg/L	75 mg/L	75 mg/L
Ácido Sulfídrico (H ₂ S)	-	(2)	(2)	(2)
Oxigênio Dissolvido (O ₂)	Presente	Presente	(2)	(2)
Temperatura	(2)	(2)	(2)	(2)
Sólidos Suspensos	5.000 mg/L	2.500 mg/L	100 mg/L	100 mg/L

FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003, p 1419 e 1420)

¹ Concentração de Sólidos Dissolvidos acima de 1000mg/L

² Aceito como recebido; nunca houve problemas com as concentrações ou valores encontrados.

³ Ausência de óleos flutuantes

QUADRO 2.36 – ESPECIFICAÇÕES DE QUALIDADE PARA ÁGUA DE MAKE UP DAS TORRES DE RESFRIAMENTO – POLO PETROQUÍMICO DE MAUÁ/SP

Parâmetros	Limites exigidos
Cloretos (Cl)	70 mg/L
Sólidos Dissolvidos Totais - SDT	200 mg/L
Dureza (CaCO ₃)	70 mg/L
Alcalinidade (CaCO ₃)	50 mg/L
pH	6,5 – 7,5
Demanda Química de Oxigênio - DQO	2 mg/L
Sólidos Suspensos Totais - SST	2 mg/L
Turbidez	1 NTU
Cloro Livre	0,5 – 1 mg/L
Detergentes	< 1,0 mg/L
Amônia (NH ₄ -H)	1,0 mg/L
Fosfato (PO ₄)	1,0 mg/L
Sílica (SiO ₂)	10 mg/L
Alumínio (Al)	0,3 mg/L
Ferro (Fe)	0,3 mg/L
Manganês (Mn)	0,1 mg/L
Enxofre (S)	0 mg/L
Zinco (Zn)	0,1 mg/L
Sulfatos	50 mg/L

FONTE: MANCUSO (2000)

2.2.2.6. Reúso planejado para recarga de aquífero subterrâneo

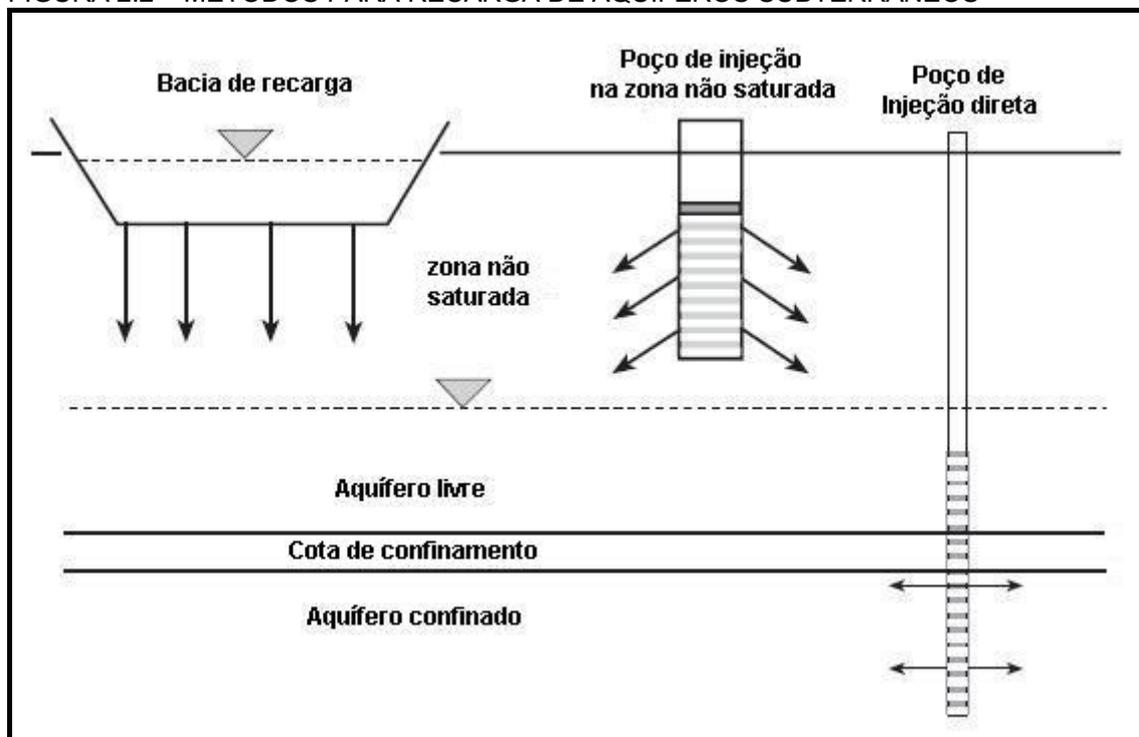
A recarga de um aquífero subterrâneo, de acordo com AWWA (1983), pode ter os seguintes objetivos: evitar o rebaixamento do seu nível, protegê-lo contra a intrusão de água do mar e armazenar esgoto tratado para uso futuro.

Segundo METCALF & EDDY (2003) existem dois métodos mais comumente usados para recarga de aquíferos com água recuperada:

- Infiltração superficial através de bacias, e;
- Injeção direta dentro de aquíferos subterrâneos.

Já a US EPA (2004) apresenta três formas de recarga, sendo as duas já citadas por Metcalf & Eddy, mais a injeção pela zona não saturada do aquífero subterrâneo. Este método foi desenvolvido nos anos 90 e é largamente utilizada em cidades da região metropolitana de Phoenix, Arizona. Consiste de fazer poços com 6 metros de diâmetro e 100 a 150 metros de profundidade e despejar água para posterior percolação no solo. Este método tem a vantagem de ser mais barato que o da injeção direta. A Figura 2.2 apresenta esquematicamente as três opções de recarga de aquíferos.

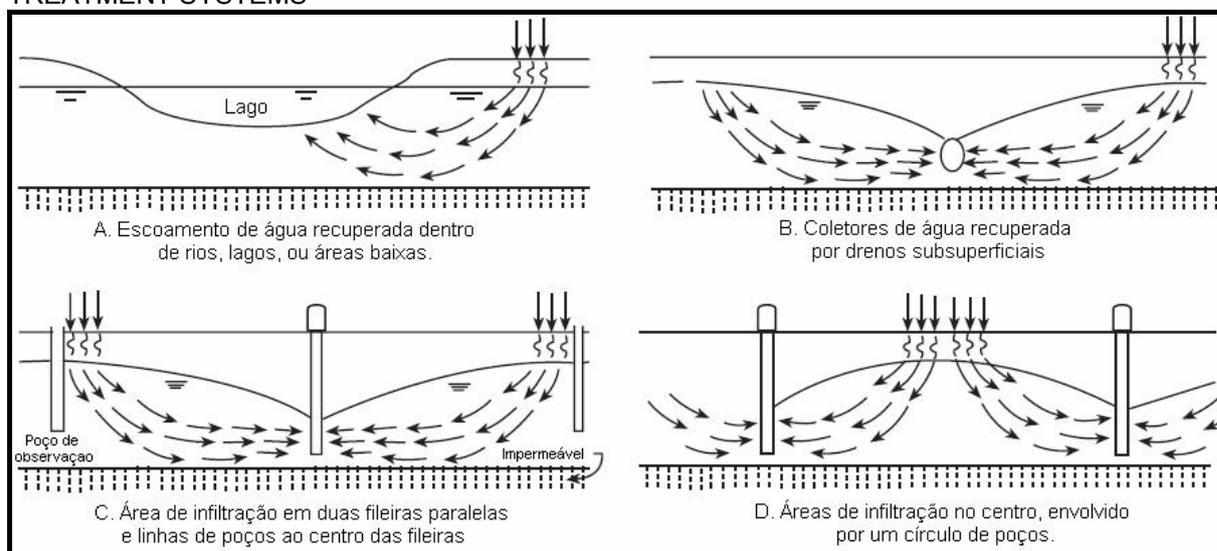
FIGURA 2.2 – MÉTODOS PARA RECARGA DE AQUÍFEROS SUBTERRÂNEOS



FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

Quando as condições hidrogeológicas forem favoráveis para a recarga de aquífero por bacia de infiltração, a água recuperada pode ser usada de uma forma relativamente simples e rápida na infiltração. Esta forma de infiltração no solo é chamada de *Soil-Aquifer Treatment Systems* – SAT, ou Sistema de Tratamento Solo Aquífero, que é citado tanto na US EPA (2004) como em METCALF & EDDY (2003). Na Figura 2.3 é apresentado de forma esquemática as maneiras como são feitos o SAT, onde se consegue tratar de forma convencional um efluente tratado secundariamente através de sua passagem pelo solo e pela zona não saturada (zona vadosa). A extração posterior desta água pode ser usada para irrigação de variadas culturas comestíveis.

FIGURA 2.3 – SISTEMA DE TRATAMENTO SOLO-AQUÍFERO – SAT - SOIL-AQUIFER TREATMENT SYSTEMS



FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

2.2.2.6.1 Critérios para reúso em recarga de aquíferos subterrâneos

Em sua revisão de 2004, a US EPA 625/R-04/108 apresenta uma tabela sugestiva (Quadro 2.37) para os critérios e diretrizes no uso de água recuperada em recarga de aquíferos. Apesar de comentar o tipo de tratamento, a tabela deixa a especificação de qualidade, monitoramento e distância de proteção a cargo de cada local onde será feito a recarga. Como a recarga de aquíferos subterrâneos pode também ser considerada como reúso potável indireto, os critérios apresentados na seção 2.2.1.2.1 podem ser aplicados para este caso.

QUADRO 2.37 – CRITÉRIOS E DIRETIZES DA U.S. E.P.A. PARA RECARGA DE AQUÍFEROS

Tipo de reúso	Tratamento	Qualidade da água recuperada¹	Monitoramento da água recuperada	Distância mínima de proteção²	Comentários
<i>Recarga de Aquíferos</i> Por espalhamento ou injeção dentro de aquíferos não usados como fonte pública de água potável.	- Especificado no local e dependendo do uso; - No mínimo primário se for por espalhamento; -No mínimo secundário se for por injeção.	- Especificado no local e dependendo do uso.	- Dependendo do tratamento e uso.	-Especificado no local.	- As instalações devem ser projetadas para assegurar que a água recuperada não atinja aquíferos que sejam fontes de água potável; - Para projetos por espalhamento, tratamento secundário pode ser necessário para prevenir entupimentos; - Para projetos por injeção, filtração e desinfecção podem ser necessários para prevenir entupimentos.

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ Salvo notações diferentes, a aplicação dos limites de qualidade recomendados para água recuperada é no ponto de descarte das instalações de tratamento

² Distâncias mínimas de proteção são recomendadas para proteger as fontes de água potável de contaminações e para proteger pessoas de riscos a saúde devido à exposição à água recuperada

Nos Estados Unidos, alguns estados já possuem legislação definida, como pode ser visto no Quadro 2.38.

QUADRO 2.38 – CRITÉRIOS E DIRETIZES PARA RECARGA DE AQUÍFEROS EM ALGUNS ESTADOS AMERICANOS

	Califórnia¹	Florida	Havaí	Washington
Tratamento	Caso a caso	Tratamento secundário e desinfecção básica	Caso a caso	Oxidado, coagulado, filtrado e desinfectado
DBO₅		NE ²		5 mg/L
SST		10 mg/L		5 mg/L
Turbidez		NE ²		2 NTU (méd) 5 NTU (máx)
Coliformes		NE ²		2,2/100 mL (méd) 23/100 mL (máx)
Nitrogênio Total		12 mg/L		NE ²

FONTE: Adaptado de US EPA 625/R-04/108 (2004)

¹ Recarga de aquífero na Califórnia e Havaí são determinados caso a caso

² NE – Não especificado pelas leis do estado

O Quadro 2.39 apresenta a base inicial dos critérios usados pelo estado da Califórnia para a recarga de aquíferos subterrâneos. Estes critérios foram criados pelo Departamento de Saúde deste estado em 2000 e apresentado no seu código de regulamentação chamado *Water Recycling Criteria* (METCALF & EDDY, 2003).

QUADRO 2.39 – BASE CONCEITUAL PARA A PROPOSIÇÃO DOS CRITÉRIOS PARA RECARGA DE AQUÍFEROS SUBTERRÂNEOS NA CALIFÓRNIA¹

Tipo de Contaminante	Tipo de Recarga	
	Infiltração Superficial	Injeção Subsuperficial
Microrganismos patogênicos:		
Tratamento Secundário	SST ≤ 30 mg/L	
Filtração	≤ 2 NTU	
Desinfecção	4-Log inativação de vírus, ≤ 2,2 coliformes totais em 100 mL	
Tempo de retenção no subsolo	6 meses	12 meses
Separação horizontal	152 metros	61 metros
Contaminantes regulamentados:	Chegar aos padrões de água potável	
Contaminantes não regulamentados:		
Tratamento Secundário	DBO ≤ 30 mg/L e COT ≤ 16 mg/L	
Osmose Reversa	Quatro opções disponíveis devendo chegar à exigência de 1,0 mg/L COT	100% de tratamento para: $COT \leq \frac{1mg}{L} \frac{1}{RWC^2}$
Critério de infiltração por SAT 50% de remoção de COT	Camada acima do aquífero para taxa inicial de percolação: < 5 mm/min = 0,9 m < 7,5 mm/min = 3,1 m	NA
Opção de monitoramento por barreira	Demonstrar possibilidade de conformidade com o ponto de barreira	NA
Contribuição da água recuperada (RWC)	≤ 50%	

FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003)

¹ Adaptado de Califórnia Department of Health Services Working Paper (2000)

².RWC = Percentagem de contribuição da água recuperada na água potável de aquíferos subterrâneos

2.2.2.7. Reúso de água para aquicultura

De acordo com LAVRADOR FILHO (1987) o reúso de efluentes tratados para aquicultura fundamenta-se na utilização dos nutrientes contidos nestas na produção de peixes e plantas aquáticas como o aguapé, com vistas à obtenção de alimentos ou geração de energia.

Historicamente, seu desenvolvimento se deu inicialmente como técnica complementar ao tratamento de esgotos, principalmente por meio de utilização de plantas aquáticas. Posteriormente, a idéia da utilização de peixes para tal fim foi adotada principalmente com o objetivo de produção de proteínas.

O caso clássico, citado por MANCUSO e SANTOS (2003), é o do projeto implantado em Lima, Peru, por intermédio da United Development Programme (UNDP), do World Bank Integrated Resource Recovery Project e com assistência técnica alemã. Neste empreendimento, peixes e camarões são criados em lagoas de

estabilização de polimento, o que viabilizou o estudo de duas alternativas: tanques com água corrente e tanques onde a água é trocada periodicamente.

Outro objetivo desse projeto foi definir se a melhor opção para utilização dos animais é por meio de consumo direto ou indireto. Essa segunda alternativa implica o consumo de gerações derivadas dos peixes criados nas lagoas de estabilização.

Já o principal produto resultante desta pesquisa no Peru foi à elaboração de um modelo computadorizado que auxilia no dimensionamento de fazendas de pisciculturas comerciais em zonas tropicais e subtropicais. O programa também permite efetuar uma análise econômica que possibilita avaliar a viabilidade e a rentabilidade do sistema quando existem diferentes custos de terreno e tratamento (LEON e MOSCOSO, 1999).

2.2.2.7.1 Critérios para reúso em aqüicultura

A WHO (2006), no volume três de sua recente publicação para reúso de efluentes e excrementos na aqüicultura, estabeleceu alguns critérios para o uso aqüicultural que é apresentado no Quadro 2.40. Para o dimensionamento de lagoas para aqüicultura a concentração de *E. coli* deve ser $\leq 10^3$ ou $\leq 10^4$ por 100 mL e a concentração de amônia livre deve ser inferior a 0,5 mg/L de forma a evitar a toxicidade aguda dos peixes.

Outro fator importante citado é que a qualidade dos peixes pode variar bastante devido à característica química complexa e à quantidade de elementos traços presentes na água de alimentação das lagoas de criação. Apesar disso, os metais pesados tendem a precipitar em condições anaeróbias e com o aumento do pH nestas lagoas (WHO, 2006).

QUADRO 2.40 – DIRETRIZES MICROBIOLÓGICAS ESTABELECIDAS PELA W.H.O. PARA O USO DE EFLUENTES E EXCREMENTOS EM AQUICULTURA

Meio	Ovos de trematódeos viáveis (incluindo ovos de <i>schistosoma</i> onde relevante) (ovos/100 mL ou por grama de sólidos totais ¹)	<i>E. Coli</i> (média aritmética por 100 mL ou por grama de sólidos totais ^{1,2})	Ovos de Helminhos ³ (média aritmética por litro ou por grama de sólidos totais ^{1,4})
Consumidores do produto			
Água de lagoa/açude	Não detectável	$\leq 10^4$	≤ 1
Efluente	Não detectável	$\leq 10^5$	≤ 1
Excremento tratado	Não detectável	$\leq 10^6$	≤ 1
Partes comestíveis de peixes frescos ou plantas	Infecção metacercária (presença ou ausência por peixe ou planta) não detectável ou não infecciosa	Conforme especificações da <i>Codex Alimentarius Commission</i> ⁵	Não detectável
Trabalhadores em aquicultura e comunidade local			
Água de lagoa/açude	Não detectável ⁶	$\leq 10^3$	≤ 1
Efluente	Não detectável ⁶	$\leq 10^4$	≤ 1
Excremento tratado	Não detectável ⁶	$\leq 10^5$	≤ 1

FONTE: WHO (2006)

¹ Excremento é medido em gramas de sólidos totais (por exemplo: peso seco); 100 mL de efluente/excremento contém aproximadamente de 3 a 4 gramas de sólidos totais

² A média aritmética deve ser determinada em toda a estação de irrigação. Para água de lagoa e consumidores do produto, por exemplo, o valor da média de $\leq 10^4$ *E.coli* por 100 mL deve ser obtido por pelo menos 90% das amostras de forma a permitir amostras ocasionais de maior valor (por exemplo: 10^5 ou 10^6 *E.coli* por 100 mL)

³ Aplicável quando plantas aquáticas emergentes estão crescendo e quando existe grande contato com o efluente, excremento, água contaminada ou solo contaminado

⁴ A média aritmética deve ser determinada em toda a estação de irrigação. O valor da média de ≤ 1 ovos por litro deve ser obtido por pelo menos 90% das amostras de forma a permitir amostras ocasionais de maior valor (por exemplo: > 10 ovos por litro)

Média geométrica durante o período de criação

⁵ A *Codex Alimentarius Commission* não especifica qualidade microbiana para peixes frescos ou plantas aquáticas; preferencialmente é recomendada a adoção de análise de riscos e controle de pontos críticos, princípios igualmente aplicados da produção para o consumo

⁶ Ovos de *schistosoma* viáveis quando relevante

Segundo a Resolução do CONAMA n.º 357, capítulo 2, seção I, artigo quarto, fica estabelecido que as águas de classe 2 possam ser destinadas à aquicultura e à atividade de pesca. Estes parâmetros para águas de classe 2 podem ser observados no Quadro 2.19 do item 2.2.2.2.1 levando em consideração o inciso terceiro do artigo décimo quarto desta resolução que cita para as águas doces onde ocorrer pesca ou cultivo de organismos, para fins de consumo intensivo, além dos padrões estabelecidos no quadro 2.19, aplicam-se os seguintes padrões, conforme Quadro 2.41, em substituição ou adicionalmente:

QUADRO 2.41 – PADRÕES PARA CORPOS DE ÁGUA ONDE HAJA PESCA OU CULTIVO DE ORGANISMOS PARA FINS DE CONSUMO INTENSIVO

Parâmetros	Valores
Parâmetros inorgânicos	Valor máximo
Arsênio total	0,14 µg/L As
Parâmetros orgânicos	Valor máximo
Benzidina	0,0002 µg/L
Benzo(a)antraceno	0,018 µg/L
Benzo(a)pireno	0,018 µg/L
Benzo(b)fluoranteno	0,018 µg/L
Benzo(k)fluoranteno	0,018 µg/L
Criseno	0,018 µg/L
Dibenzo(a,h)antraceno	0,018 µg/L
3,3-Diclorobenzidina	0,028 µg/L
Heptacloro epóxido + Heptacloro	0,000039 µg/L
Hexaclorobenzeno	0,00029 µg/L
Indeno(1,2,3-cd)pireno	0,018 µg/L
PCBs - Bifenilas policloradas	0,000064 µg/L
Pentaclorofenol	3,0 µg/L
Tetracloroeto de carbono	1,6 µg/L
Tetracloroeteno	3,3 µg/L
Toxafeno	0,00028 µg/L
2,4,6-triclorofenol	2,4 µg/L

FONTE: Resolução CONAMA n.º 357 (2005)

2.3. TECNOLOGIAS USUAIS DE TRATAMENTO

Neste item são abordadas as tecnologias avançadas que são utilizadas neste estudo, pormenorizando seus processos, técnicas de aplicação e equipamentos comumente utilizados.

2.3.1. Carvão Ativado

Certos compostos orgânicos, em efluentes, são resistentes à degradação biológica e muitos outros são tóxicos ou incômodos, até mesmo em baixas concentrações. Outro agravante é que em baixas concentrações estes compostos não são facilmente removidos por tratamentos convencionais (CHEREMISINOFF, 1978). Entretanto, estes materiais podem ser freqüentemente removidos por adsorção em superfícies sólidas ativadas (ECKENFELDER, 1989).

A adsorção por carvão ativado, mais especificamente, é a utilização de uma forma de carbono especificamente tratada para aumentar suas propriedades de adsorção. Possui estrutura amorfa e imensa área superficial interna, ficando numa faixa entre 500 e 1.400 m²/g e podendo chegar acima de 2.500 m²/g em alguns

carvões especiais (CHEREMISINOFF, 1978). O carvão ativado pode derivar de qualquer matéria prima de origem carbonácea, podendo ser vegetal, mineral ou animal.

Seu processo de produção consiste em duas etapas, sendo primeiramente a carbonização e posteriormente a ativação. A carbonização consiste em queimar a matéria prima, sem oxigênio podendo ser em fornos comuns ou mais modernos como os rotativos. O processo de ativação pode ser físico, químico ou a combinação dos dois processos. A ativação consiste na oxidação do carvão obtido da primeira fase através de agentes oxidantes que na presença do carbono do carvão liberam CO e CO₂ desenvolvendo a estrutura de poros. Esta grande área interna é dividida entre os macroporos (25 > ηm), mesoporos (> 1ηm e < 25 ηm) e os microporos (< 1 ηm) (METCALF & EDDY, 2003).

Depois do processo de ativação, o carvão pode ser separado em, ou preparado em diferentes tamanhos e com diferentes capacidades de adsorção. As duas classificações por tamanho é o Carvão Ativado em Pó (CAP) que possui diâmetro típico de 0,074 mm (peneira 200) e o Carvão Ativado Granulado (CAG), com diâmetro maior que 0,10 mm (peneira ≥140). As características dos carvões em pó e granulado são resumidas no Quadro 2.42 (METCALF & EDDY, 2003).

QUADRO 2.42 – COMPARAÇÃO ENTRE CARVÃO ATIVADO GRANULAR E CARVÃO ATIVADO EM PÓ

Parâmetro	Unidade	Tipo de carvão ativado ¹	
		CAG	CAP
Área superficial total	m ² /g	700-1300	800-1800
Densidade de massa	kg/m ³	400-500	360-740
Densidade da partícula, molhada em água	kg/L	1,0-1,5	1,3-1,4
Variação do tamanho da partícula	mm (μm)	0,1-2,36	(5-50)
Tamanho efetivo	mm	0,6-0,9	-
Coefficiente de uniformidade	CU	≤1,9	-
Raio médio dos poros	Å	16-30	20-40
Número de iodo		600-1100	800-1200
Número de abrasão	Mínimo	75-85	70-80
Cinzas	%	≤8	≤6
Umidade quando embalado	%	2-8	3-10

FONTE: METCAL & EDDY (2003).

¹ Alguns valores específicos vão depender da matéria-prima usada na produção do carvão ativado

O carvão ativado atende a uma vasta aplicação, podendo atuar no tratamento de efluentes extraíndo cor, odor, matéria orgânica, compostos tóxicos e servindo de suporte para a biomassa. Pode ser usado também no tratamento de água na

retirada de cor, sabor, odores desagradáveis, contaminantes presentes na água como pesticidas, herbicidas, entre outros. No tratamento do ar e na adsorção de gases o carvão ativado atua como filtro adsorvendo contaminantes nocivos ao ar e adsorvendo gases através da condensação capilar, respectivamente. Também é aplicado em processos para melhoria da qualidade de produtos de vários segmentos industriais como o farmacêutico, químico, de alimentos e bebidas.

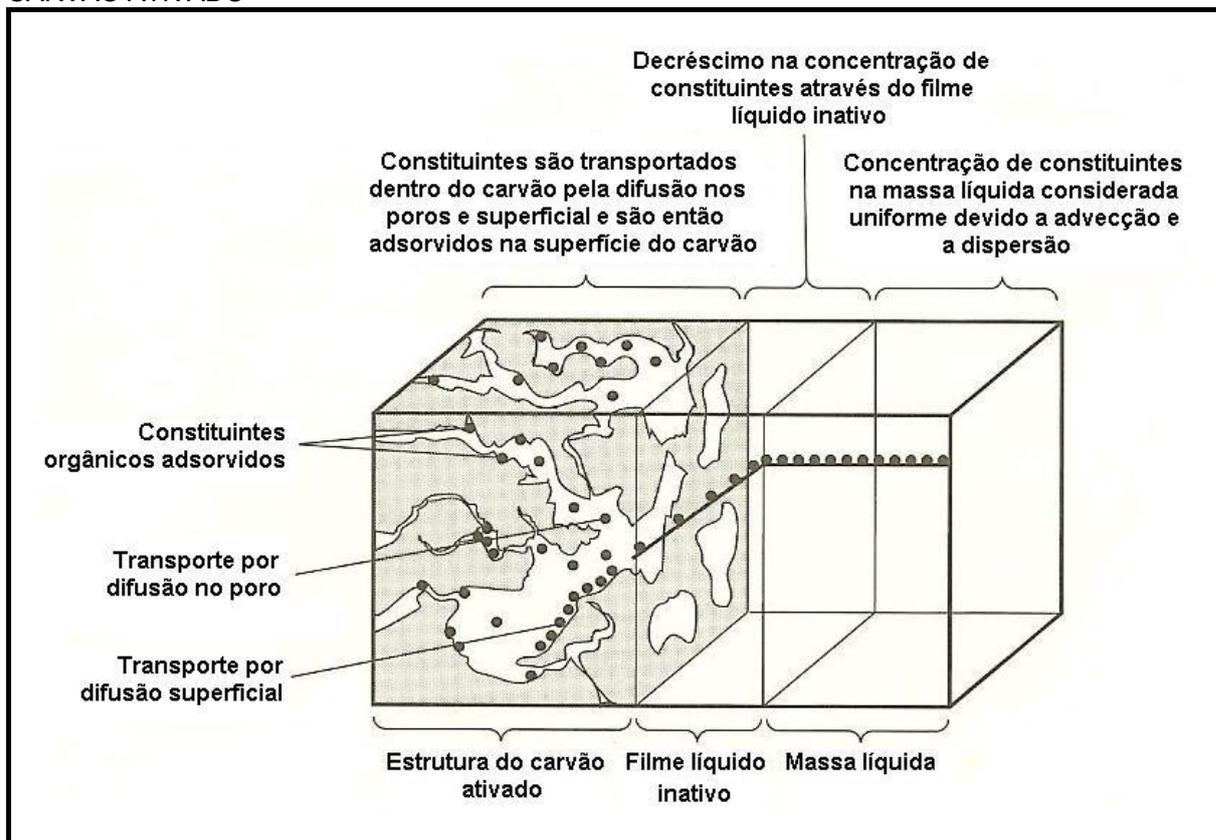
2.3.1.1. Fundamentos da Adsorção

O processo de adsorção ocorre em fronteiras do tipo sólido-sólido, gás-sólido, gás-líquido, líquido-líquido ou líquido-sólido. A adsorção com sólidos como carvão é dependente da área superficial do sólido. Deste modo, tratamento de água com carvão envolve a interface líquido-sólido (CHEREMISINOFF, 1978).

O processo de adsorção, ilustrado na Figura 2.4, pode ser descrito em média por quatro passos: (1) transporte pela massa líquida, (2) transporte por difusão no filme líquido, (3) transporte através do poro e (4) adsorção. O transporte pela massa líquida envolve o movimento da matéria orgânica por essa grande massa até o limite do filme líquido fixo que envolve o adsorvente, tipicamente por advecção e dispersão em reatores de carvão ativado. O transporte por difusão no filme líquido envolve o transporte por difusão do material orgânico através do filme líquido inativo até a entrada dos poros do adsorvente. O transporte nos poros envolve o transporte do material a ser adsorvido através dos poros por uma combinação de difusão molecular pelo líquido do poro e/ou por difusão ao longo da superfície do adsorvente. A adsorção envolve a fixação do material a ser adsorvido em uma parte disponível no adsorvente. A adsorção pode ocorrer na superfície externa do adsorvente e em seus macroporos, mesoporos, microporos e submicroporos, apesar da área dos macro e mesoporos serem muito pequenas comparadas com as áreas dos micro e submicroporos (METCALF & EDDY, 2003).

A adsorção ocorre em ambos os processos, físico e químico de acúmulo de substâncias em uma interface entre as fases líquida e sólida (KIELY, 1996; CHEREMISINOFF, 1978).

FIGURA 2.4 – ESBOÇO DA DEFINIÇÃO DE ADSORÇÃO DE CONSTITUINTES ORGÂNICOS EM CARVÃO ATIVADO



FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003)

A adsorção física resulta da condensação molecular nos capilares do sólido como resultado da ação de diferentes forças elétricas de atração (forças de van der Waals). A adsorção química resulta da formação de uma camada monomolecular do contaminante adsorvido na superfície sólida do adsorvente, através das forças de valência residual da superfície das moléculas. Diferente da adsorção física, a adsorção química tende a ser irreversível, devido ser necessário energia para formar o novo composto químico na superfície do adsorvente, e, também mais energia deverá ser necessária para reverter o processo. A reversibilidade da adsorção física depende do poder das forças de atração entre o adsorvente e o adsorvido. Se estas forças forem fracas, o processo contrário pode ser atingido. Em geral, substâncias com alto peso molecular são mais facilmente adsorvidas (ECKENFELDER, 1989; CHEREMISINOFF, 1978).

Os fatores que afetam a adsorção incluem (CHEREMISINOFF, 1978):

- As características físicas e químicas do adsorvente (área superficial, tamanho do poro, composição química, etc.);

- As características físicas e químicas do material a ser adsorvido (tamanho molecular, polaridade molecular, composição química, etc.);
- A concentração do material a ser adsorvido em meio líquido (solução);
- As características da fase líquida (pH, temperatura) e;
- Tempo de residência do sistema.

2.3.1.2. Regeneração e reativação do carvão

A aplicação de forma econômica do carvão ativado depende de um eficiente meio de regeneração e reativação do carvão depois que sua capacidade de adsorção tenha se exaurido. O objetivo deste processo é a remoção do material adsorvido da estrutura porosa do carvão (ECKENFELDER, 1989; CHEREMISINOFF, 1978).

Regeneração é o termo usado para descrever todo o processo que é feito para recuperar o poder de adsorção gasto do carvão, sem reativação, podendo ser por (METCALF & EDDY, 2003):

- Oxidação química do material adsorvido;
- Processo térmico;
- Vapor para retirada de material adsorvido de dentro do carvão;
- Solventes, e;
- Processos de conversão biológica.

A regeneração do carvão ativado granulado (CAG) é de certa forma simples. Os métodos anteriormente apresentados, com exceção do térmico, são preferidos desde que possam ser aplicados *in situ*. A regeneração térmica consiste na aplicação de calor no carvão dentro de um forno. A temperatura varia entre 650 e 980°C. Neste forno o carvão é seco de residuais de água e os adsorventes orgânicos são volatilizados e oxidados. Neste processo, os gases da combustão, o vapor de água e o oxigênio são controlados para manter ideais as condições de combustão (ECKENFELDER, 1989; CHEREMISINOFF, 1978).

Normalmente uma parte da capacidade de adsorção do carvão, que fica em torno de 4 a 10%, é perdida durante o processo de regeneração. Essa porcentagem

vai depender dos compostos adsorvidos e o método de regeneração usado (CRITTENDEN, 2000, citado por METCALF & EDDY, 2003).

A regeneração do carvão ativado em pó (CAP) apresenta problemas devido à metodologia de sua regeneração não ser bem definida o que limita seu uso, principalmente quando o carvão foi produzido da reciclagem de despejos sólidos (METCALF & EDDY, 2003).

A reativação do carvão granular envolve essencialmente o mesmo processo no qual ele é produzido quando virgem. O carvão exaurido é reativado em fornos onde o processo acontece da seguinte forma: (1) o carvão é aquecido para a retirada do material adsorvido da estrutura porosa, (2) durante este processo de retirada do material adsorvido, alguns novos compostos (alcatrão, metanol, entre outros.) são formados na superfície do carbono, e (3) na fase final do processo de reativação acontece a queima destes novos compostos formados e do restante do material adsorvido. Essa reativação resulta na perda de 2 a 5% da capacidade de adsorção do carvão. Outro fator que deve ser levado em consideração na hora de optar pelo carvão ativado e sua regeneração ou reativação é uma perda adicional de 4 a 8% devido ao atrito durante o manuseio. Tubulações, conexões e o tipo de bombeamento causam atrito através da abrasão e do impacto (METCALF & EDDY, 2003).

2.3.1.3. Isotermas de adsorção

A quantidade de material a ser adsorvido que pode ser capturada pelo adsorvente é função das características e da concentração do adsorvido e também da temperatura. As características relevantes do adsorvido já citadas anteriormente por CHEREMISINOFF (1978) são: solubilidade, estrutura molecular, peso molecular, polaridade e hidrocarboneto saturado. Geralmente, a quantidade de material adsorvido é determinada como função da concentração a uma temperatura constante, e a função resultante é chamada de isoterma de adsorção (METCALF & EDDY, 2003).

Equações freqüentemente utilizadas para descrever os dados experimentais das isotermas foram desenvolvidas por Freundlich, Langmuir, e Brunauer, Emmet, e Teller. Destas três, a isoterma de Freundlich é a mais comumente utilizada para

descrever as características de adsorção do carvão ativado usado em tratamento de água e efluentes. Derivadas empiricamente em 1912, as Isotermas de Freundlich são definidas de acordo com as Equações 2.1, 2.2 e 2.3 (CHEREMISINOFF, 1978; ECKENFELDER, 1989; METCALF & EDDY, 2003):

$$\frac{x}{m} = K_f \cdot C_e^{1/n} \quad (2.1)$$

A isoterma de Freundlich também pode ser escrita na forma logarítmica:

$$\log\left(\frac{x}{m}\right) = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.2)$$

Onde: x = massa da substância adsorvida (mg);
 m = massa de adsorvente (g);
 K_f = fator de capacidade de Freundlich (mg adsorbado/g de carvão ativado) (L água/mg adsorbado)^{1/n};
 C_e = concentração de equilíbrio do adsorbado na solução após a adsorção (mg/L);
 $1/n$ = parâmetro de intensidade de Freundlich.

A equação de Langmuir é derivada de considerações racionais, baseada no equilíbrio entre a condensação e a evaporação das moléculas adsorvidas, considerando uma camada monomolecular de adsorção. A equação pode ser expressa conforme segue (ECKENFELDER, 1989; METCALF & EDDY, 2003):

$$\frac{x}{m} = \frac{a \cdot b \cdot C_e}{1 + b \cdot C_e} \quad (2.3)$$

A equação da Langmuir pode ser reescrita na forma linear, de acordo com a Equação 2.4:

$$\frac{C_e}{(x/m)} = \frac{1}{a \cdot b} + \frac{1}{a} C_e \quad (2.4)$$

Onde: x = massa da substância adsorvida (mg);
 m = massa de adsorvente (g);

a, b = constantes empíricas;

C_e = concentração de equilíbrio do adsorbado na solução após a adsorção (mg/L).

Visto que a maioria dos efluentes contém mais do que uma substância a ser adsorvida, a aplicação direta da equação da Langmuir não é possível. Para solucionar este problema devem ser desenvolvidas correlações para calcular a adsorção com duas ou mais substâncias (ECKENFELDER, 1989).

As isotermas fornecem uma grande quantidade de dados de forma concisa e pronta para avaliação e interpretação, como por exemplo: (1) grau de remoção dos compostos orgânicos, determinando a eficiência do tratamento por adsorção e se pode ou não ser aplicado sozinho, (2) efeitos do pH e da temperatura no processo e (3) a capacidade do carvão ativado, para a aplicação em estudo (US EPA, 1973).

2.3.1.4. Aplicações para os tratamentos com carvão ativado

A adsorção em carvão ativado é usada principalmente para remover compostos orgânicos de difícil tratamento bem como quantias de compostos inorgânicos, tais como nitrogênio, sulfetos e metais pesados. A remoção de odor de efluentes é outra importante aplicação, essencialmente quando se trata de reúso. Ambos, carvão ativado em pó e granulado são usados e mostram ter uma baixa afinidade de adsorção para espécies orgânicas polares de baixo peso molecular. Se a atividade for baixa no reator de carvão ou em outros processos unitários biológicos, estas espécies são difíceis de remover com carvão ativado. Sob condições normais, após o tratamento com carvão ativado, o efluente permanece com uma DBO entre 2 e 7 mg/L e a DQO figura na faixa entre 10 e 20 mg/L. Já, sob condições ótimas, a DQO do efluente mostra-se que pode ser reduzida para uma concentração menor que 10 mg/L (METCALF & EDDY, 2003).

2.3.1.5. Tratamento com carvão ativado granulado CAG

O tratamento com CAG envolve a passagem do líquido a ser tratado através de um leito de carvão ativado que fica confinado em um reator. Diversos tipos de reatores são usados no tratamento avançado de efluente. Os sistemas típicos podem ser bombeados ou por gravidade, de fluxo descendente ou ascendente e

ainda podem ser de unidades com leito fixo contendo duas ou três colunas em série ou leito expandido de fluxo ascendente-contracorrente (METCALF & EDDY, 2003).

Para obter as dimensões de um reator, quatro fatores são importantes: o tempo de contato, a taxa de carregamento hidráulica, a altura de carvão e o número de reatores. No Quadro 2.43 são apresentadas informações típicas para projeto e dimensionamento de três dos quatro primeiros fatores citados anteriormente (METCALF & EDDY, 2003).

QUADRO 2.43 – VALORES TÍPICOS DE PROJETO PARA REATORES COM CARVÃO ATIVADO GRANULAR

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Vazão	V	m ³ /h	50-400
Volume da cama/leito	Vb	m ³	10-50
Área da seção transversal	Ab	m ²	5-30
Comprimento	D	m	1,8-4
Fração de vazios	α	m ³ /m ³	0,38-0,42
Densidade do CAG	ρ	kg/m ³	350-550
Velocidade de aproximação	Vf	m/h	5-15
Tempo de contato efetivo	t	min	2-10
Tempo de contato do leito vazio	EBCT	min	5-30
Tempo de operação	t	d	100-600
Volume	VL	m ³	10-100
Volume específico	Vsp	m ³ /kg	50-200
Volumes da(o) cama/leito	BV	m ³ /m ³	2.000-20.000

FONTE: METCAL & EDDY (2003)

Segundo KIELY (1996), deve-se levar em conta um tempo de contato que pode variar de 15 a 20 minutos para efluentes com DQO entre 10 e 20 mg/L e acima de 30 minutos para efluentes com DQO entre 5 e 10 mg/L. Para a taxa de carregamento hidráulica, o autor sugere valores entre 2 a 7 L/m²/s para fluxo ascendente e uma altura de coluna variando de 3 a 12 metros com proporção entre altura e diâmetro maior que 2.

O carvão ativado granulado também deve obedecer algumas especificações típicas para atender requisitos mínimos de projeto. Requisitos estes que podem ser visualizados no Quadro 2.44.

QUADRO 2.44 – ESPECIFICAÇÕES TÍPICAS PARA CARVÃO ATIVADO GRANULAR

Parâmetro	Unidade	Valor
Área superficial total	m ² /g	700-1300 ⁽¹⁾
Densidade de massa	kg/m ³	400-440 ⁽¹⁾
Densidade da partícula, molhada em água	kg/L	1,3-1,5 ⁽¹⁾
Tamanho efetivo	mm	0,8-0,9 ⁽¹⁾
Coefficiente de uniformidade	CU	≤1,9
Diâmetro médio da partícula	mm	1,5-1,7
Número de iodo		800 min
Número de abrasão	Mínimo	70 min
Cinzas	%	8 max
Umidade quando embalado	%	4-6 max

FONTE: METCAL & EDDY (2003)

⁽¹⁾ Depende da matéria-prima usada na produção do carvão

2.3.1.6. Tratamento com carvão ativado em pó CAP

O uso de carvão ativado em pó (CAP) é uma forma alternativa ao uso do carvão ativado granulado. O CAP tem sido aplicado diretamente em vários tipos de efluentes de processos de tratamento biológico e no processo de fluxo de tratamentos físico-químicos. No caso de plantas de tratamento biológico o CAP é adicionado ao efluente na bacia de contato. Após certo tempo de contato, o carvão está disponível para assentar no fundo do tanque, e a água tratada é então removida. Devido o carvão ser muito fino, pode ser necessário à adição de um coagulante, como um polieletrólito, para ajudar na remoção das partículas de carvão, ou ainda filtração através de filtros rápidos de areia. A aplicação de CAP diretamente no tanque de aeração de lodos ativados permite uma efetiva remoção de compostos orgânicos persistentes. Nos processos de tratamento físico-químicos o CAP é aplicado em conjunto com produtos químicos usados para precipitação de constituintes específicos (METCALF & EDDY, 2003).

Em termos de eficiência, tanto o CAP quanto o CAG são semelhantes. A diferença é que a aplicação do carvão em pó é limitada, cabendo apenas em situações atípicas, como problemas de odores ou remoção de contaminantes não característicos da instalação, ao passo que o CAG é aplicado, principalmente, em colunas estacionárias, através das quais o efluente flui (MIERZWA, 2005).

As principais vantagens do CAP em relação ao CAG é o investimento inicial bem menor e a flexibilidade da alteração da dosagem aplicada com a mudança da qualidade da água. As desvantagens estão relacionadas à impossibilidade de regeneração, a remoção relativamente baixa dos compostos orgânicos voláteis, a

dificuldade na disposição do lodo e a remoção das próprias partículas do carvão (DI BERNARDO, 1993).

2.3.2. Oxidação Via Ozonização

O ozônio foi descoberto pelo pesquisador europeu C. F. Schonbein em 1839, sendo usado comercialmente pela primeira vez em 1907 no tratamento de água municipal de Nice e em 1910 em São Petersburgo (KOGELSCHATZ, 1988).

O ozônio (O_3) é uma forma alotrópica de alta energia do elemento oxigênio (RICHTER, 1991). O ozônio é um gás azul, porém, em concentrações em que ele é normalmente produzido, sua cor não é observada. A 112°C negativos, o ozônio condensa em um líquido azul escuro. O ozônio líquido é facilmente explosivo se ocorrer uma mistura com oxigênio superior a 20%. Estas explosões podem ser detonadas através de descargas elétricas ou repentinas mudanças de temperatura ou pressão. No entanto, em seu uso prático, explosões são extremamente raras (OEHLSCHLAEGER, 1978, citado por GUZEL-SEYDIM *et al.*, 2003). No Quadro 2.45 são apresentadas as principais propriedades físicas do ozônio puro.

QUADRO 2.45 – PROPRIEDADES DO OZÔNIO

Propriedade	Unidade	Valor
Peso molecular	g	48
Ponto de ebulição	$^\circ\text{C}$	$-111,9 \pm 0,3$
Ponto de fusão	$^\circ\text{C}$	$-192,5 \pm 0,4$
Volume específico do vapor a 0°C e 1 atm	m^3/kg	0,464
Temperatura crítica	$^\circ\text{C}$	-12,10
Pressão crítica	atm	54,60

FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003)

Em 1914 o número de estações de tratamento de água utilizando ozônio cresceu e, na Europa, havia pelo menos 49 instalações. Em 1936 o número passou para 100 instalações na França e 140 no mundo. O cloro, sempre mais barato e mais usado, acabou tendo sua aplicação limitada, quando em 1975 foi descoberto que compostos organoclorados (subprodutos das reações do cloro com matéria orgânica) eram cancerígenos (SNATURAL, 2005).

Considerado um bom agente oxidante devido a sua grande instabilidade, possui potencial de oxidação igual a 2,08, perdendo apenas para o Radical Hidroxila que tem potencial de oxidação igual a 2,80 e o Flúor com 3,06. O Quadro 2.46

apresenta a comparação do potencial de oxidação do ozônio com o de outros agentes oxidantes disponíveis.

QUADRO 2.46 – POTENCIAL DE OXIDAÇÃO DE VÁRIOS AGENTES OXIDANTES

Agente Oxidante	Potencial de Oxidação (Volts)	Poder relativo de Oxidação ¹
Flúor	3,06	2,25
Radical Hidroxila	2,80	2,05
Oxigênio (atômico)	2,42	1,78
Ozônio	2,08	1,52
Peróxido de Hidrogênio	1,78	1,30
Permanganato de Potássio	1,70	1,25
Hipoclorito	1,49	1,10
Cloro	1,36	1,00
Dióxido de Cloro	1,27	0,93
Oxigênio (molecular)	1,23	0,90

FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003)

¹ Baseado no cloro como referência (=1,00)

Como ocorre com o oxigênio, a solubilidade do ozônio depende da temperatura, da pressão parcial do ozônio na fase gasosa e recentemente também tem sido considerada função do pH (ECKENFELDER, 1989). Em comparação com o oxigênio, o ozônio em água é 13 vezes mais solúvel e a solubilidade é progressivamente maior à medida que a água tem menor temperatura (RICE, 1986 citado por: GUZEL-SEYDIM *et al.*, 2003). No Quadro 2.47 é mostrada a solubilidade do ozônio para diversas temperaturas da água. A decomposição do ozônio é mais rápida mediante altas temperaturas da água (RICE *et al.*, 1981, citado por: GUZEL-SEYDIM *et al.*, 2003).

QUADRO 2.47 – RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA E SOLUBILIDADE DO OZÔNIO EM ÁGUA

Temperatura (°C)	Solubilidade (litro de ozônio/litro de água)
0	0,640
15	0,456
27	0,270
40	0,112
60	0,000

FONTE: Adaptado de GUZEL-SEYDIM *et al.*, (2003)

A maior vantagem é que o ozônio pode ser aplicado em estado gasoso e, portanto, não aumenta o volume da água residual e do lodo, além de o ozônio não ser afetado pela presença de amônia, da maneira como o cloro é.

2.3.2.1. Aplicações

O ozônio têm suas aplicações ligadas ao tratamento de água potável, de água de processo e de efluentes para desinfecção nos processos de lavagem (lavagem

de frutas, legumes e verduras), desinfecção de piscinas, desinfecção de sistemas de lavagem de garrafas, remoção de ferro e manganês, melhoria de gosto e odor, eliminação de limo e depósitos em tubos, trocadores de calor e conexões, entre outras atividades que podem ser citadas a seguir (SNATURAL, 2005):

- Água mineral (enxágüe de desinfecção de reatores, tanques, garrafas);
- Água de resfriamento;
- Efluentes de indústrias químicas e farmacêuticas;
- Efluente de fábrica de papel e celulose;
- Redução de odor e NO_x ;
- Processos de branqueamento;
- Processo de lavagem (saladas, entre outros);
- Tratamento de lixívia, chorume;
- Efluente de indústria têxtil;
- Processos de síntese;
- Branqueamento de matérias primas e produtos;
- Oxidação de gases;
- Desinfecção de água fresca, água de processo e água de resfriamento;
- Desinfecção, descoloração, desodorização e desintoxicação de efluentes e melhoria de sua biodegradabilidade.

Dentro destas aplicações citadas, a oxidação por ozônio tem vários efeitos, como os citados por Richter (1991):

- Oxidação da matéria orgânica, produzindo ozonidas e CO_2 ;
- Alveamento e melhoria da cor;
- Redução de teores de ferro e manganês;
- Ação sobre ácidos húmicos, formando produtos biodegradáveis;
- Desintegração de fenóis;
- Remoção de certas substâncias orgânicas não biodegradáveis.

Como consequência destes efeitos pode-se ter a redução de DQO, DBO, COT, sabor, odor e trihalometanos (THMs).

2.3.2.2. Tecnologias disponíveis

Até o presente momento, uma grande variedade de tecnologias, utilizando ozônio ou não, estão disponíveis para produção do radical hidroxila em fase aquosa. Estas tecnologias são apresentadas no Quadro 2.48 sendo divididas em processos que utilizam ou não ozônio na reação (METCALF & EDDY, 2003).

QUADRO 2.48 – EXEMPLOS DE TECNOLOGIAS UTILIZADAS PARA PRODUZIR O RADICAL LIVRE HIDROXILA REATIVO, OH⁻

Processo baseado em ozônio	Processos não baseados em ozônio
Ozônio em pH elevado (8 para > 10)	H ₂ O ₂ + UV ¹
Ozônio + UV ₂₅₄ (também aplicado em fase gasosa) ¹	H ₂ O ₂ + UV + Sal Ferroso
Ozônio + H ₂ O ₂ ¹	Irradiação de feixe de elétrons
Ozônio + UV ₂₅₄ + H ₂ O ₂ ¹	Cavitação Eletrohidráulica
Ozônio + TiO ₂	Ultrassom
Ozônio + TiO ₂ + H ₂ O ₂	Plasma não térmico
Ozônio + Irradiação de feixe de elétrons	Descarga superficial de condutor pulsada
Ozônio + Ultrassom	Fotocatálise (UV + TiO ₂)
	Radiólise Gamma
	Oxidação catalítica
	Oxidação supercrítica da água

FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003)

¹ Processo sendo usualmente utilizado (2001) em escala comercial

O ozônio pode, mesmo sem ativação e desde que o pH seja adequado, estimular, até certo ponto, a formação de radicais. No entanto, para intensificar a formação de radicais pode-se combinar o ozônio com os processos oxidativos avançados (POAs), tais como O₃/UV, O₃/H₂O₂ e O₃/TiO₂. Estes POAs são usualmente aplicados para efluentes com baixa DQO devido o alto custo do ozônio ou H₂O₂ necessários para produzir o radical hidroxila. Alguns materiais que inicialmente eram resistentes à degradação podem ser transformados em componentes que podem ser tratados biologicamente com a aplicação dos POAs. Estes processos têm se mostrado bastante eficazes no processo de descontaminação ambiental (METCALF & EDDY, 2003; ALMEIDA *et al.*, 2004).

Destas tecnologias apresentadas no quadro anterior, apenas o ozônio/UV, ozônio/peróxido de hidrogênio, ozônio/UV/peróxido de hidrogênio e peróxido de hidrogênio/UV estão sendo usadas em escala comercial (RICE, 1996, citado por: METCALF & EDDY, 2003).

No campo da pesquisa, surgem também algumas tecnologias emergentes, como a ozonização catalítica e a nanocatálise heterogênea utilizando ozônio,

mostrando-se bastante promissoras, além de constituírem a tendência atual dos processos de ozonização (ALMEIDA *et al.*, 2004).

2.3.2.3. Sistema de tratamento com ozônio

Um sistema de desinfecção por ozônio é compreendido de componentes como: (1) fornecedor de energia, (2) instalações de preparação para o fornecimento do gás como filtro, compressor, soprador, resfriador e secador de ar, (3) gerador de ozônio, (4) instalação que promova o contato do ozônio com o líquido a ser desinfetado ou oxidado, e (5) instalação de destruição do gás excedente (RICE, 1996, citado por: METCALF & EDDY, 2003).

O maior consumo de energia em sistemas de geração de ozônio é na conversão do oxigênio ou do ar para ozônio, ou seja, no gerador. O restante dos equipamentos periféricos também consome energia, porém em menor escala. O Quadro 2.49 apresenta o consumo de energia por componente envolvido no sistema (METCALF & EDDY, 2003).

QUADRO 2.49 – NECESSIDADE ENERGÉTICA TÍPICA PARA APLICAÇÃO DE OZÔNIO

Componente	kWh/kg de ozônio
Preparação do ar (compressores e secadores)	4,4 - 4,6
Gerador de ozônio:	
- Alimentado com ar	13,2 - 19,8
- Oxigênio puro	6,6 - 13,2
Reator de contato	2,2 - 6,6
Todos os outros usos	1,2 - 2,2

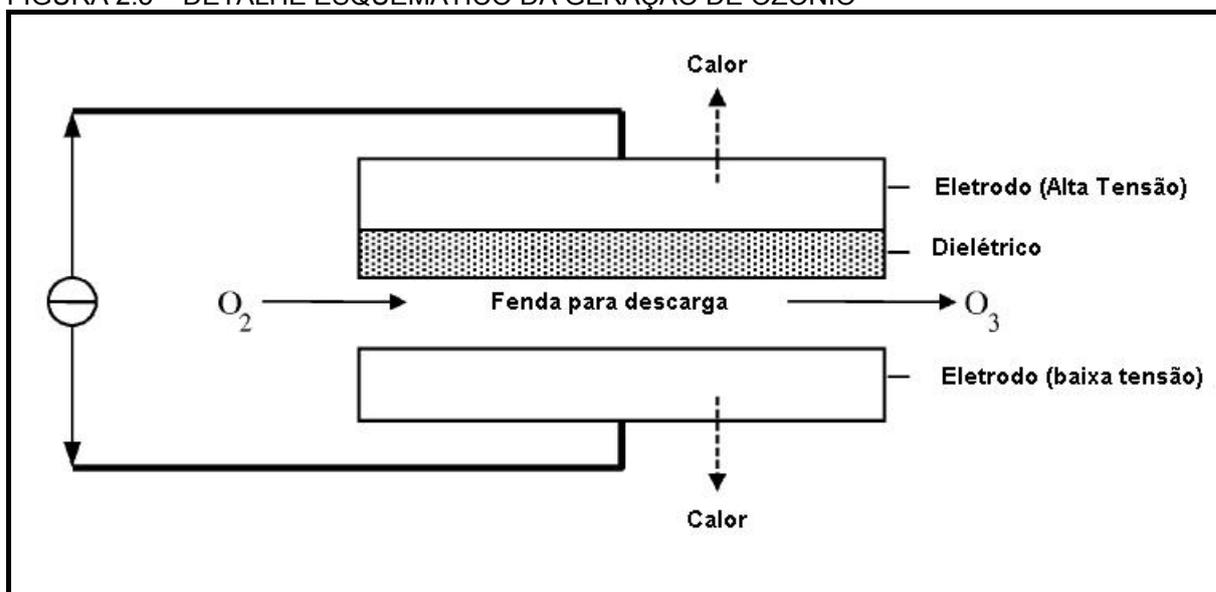
FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003)

A preparação do ar antes da geração do ozônio tem influência muito grande na eficiência do processo de geração de ozônio. Aumenta-se a eficiência, fazendo-se (RICHTER, 1991):

- Redução do teor de suspensos no ar (pó);
- A secagem do ar por refrigeração ou por passagem em dissecadores como cloreto de cálcio e sílica gel. O teor de umidade do ar deve ser inferior a 1,0 kg/m³ e, preferivelmente deve estar abaixo de 0,1 kg/m³;
- O resfriamento do ar (4°C);
- O emprego de tensões mais elevadas (10.000 a 20.000 volts);
- Aumentando-se o número de ciclos (até o máximo de 1.000 ciclos/s).

O ozônio possui alguns inconvenientes como ser quimicamente instável e se decompor em oxigênio muito rapidamente após sua geração. Por isso precisa ser gerado no local de uso. O método mais eficiente de gerar ozônio atualmente é através de descarga elétrica. O ozônio é gerado do ar ou de oxigênio puro quando uma alta voltagem é aplicada através de uma fenda estreita entre dois eletrodos (Figura 2.5). A alta energia criada pela descarga quebra uma molécula de oxigênio em duas e estas meias partes se unem com duas moléculas de oxigênio, formando o ozônio. O fluxo de gás gerado deste processo, usando ar, contém de 1 a 3% de ozônio em peso e quando é gerado a partir de oxigênio puro esta percentagem aumenta em três vezes, chegando a ficar entre 3 e 10% nos geradores mais modernos (METCALF & EDDY, 2003).

FIGURA 2.5 – DETALHE ESQUEMÁTICO DA GERAÇÃO DE OZÔNIO



FONTE: Adaptado de RICE *et al.* (1981)

Depois de gerado, o ozônio é misturado em câmara de contato, com a água ou efluente através de diferentes métodos conforme segue (RICHTER, 1991):

- Espargimento da água numa atmosfera rica em O_3 ;
- Mistura do ar ozonizado à água, através de injetores;
- Aplicação do ar ozonizado na parte inferior de uma torre de lavagem;
- Aplicação do ar ozonizado através de difusores porosos no fundo de câmaras de contato;
- Emprego de um misturador do tipo rotor mecânico (disco de alta rotação).

Após ter passado pela câmara de contato, os gases excedentes que não são usados ou seus resíduos devem ser tratados por uma unidade térmica que destrói o ozônio. O O₃ não deve ser liberado na atmosfera, pois é um gás extremamente irritante e tóxico. O produto formado da destruição do O₃ é oxigênio puro, que pode ser reciclado, se o oxigênio estiver sendo usado como fonte geradora de ozônio (METCALF & EDDY, 2003).

Uma das desvantagens da ozonização é o curto tempo de meia vida, tipicamente de 20 minutos. Este tempo pode ser reduzido ainda mais se a estabilidade for afetada pela presença de sais, pH e temperatura. Em condições alcalinas, a decomposição do ozônio é acelerada, e o monitoramento do pH do efluente é necessário.

2.3.2.4. Dosagem

A demanda de O₃ é muito influenciada pela presença de matéria orgânica na água ou efluente. As dosagens aplicadas ao efluente dependem da DQO residual a ser removida, da cor ou de outro parâmetro a ser oxidado. Segundo RICHTER (1991), as dosagens variam de 0,3 a 2,0 mg/L. O autor também cita que com um residual de 0,2 mg/L se reduz mais de 99% dos coliformes. Destrói esquistossomos em apenas 3 minutos, com dosagens de 0,9 mg/L.

METCALF & EDDY (2003) também citam que as dosagens de desinfecção com ozônio podem ser estimadas considerando (1) a demanda inicial de ozônio do efluente, ou (2) utilizando a demanda baseada no cálculo através das Equações 2.5 e 2.6:

$$\frac{N}{N_0} = \left[\frac{(U)}{q} \right]^{-n} \text{ para } U > q \quad (2.5)$$

Onde: N = número de organismos restantes depois da desinfecção, NMP/100 mL;

N₀ = número de organismos presentes antes da desinfecção, NMP/100 mL;

U = dose de ozônio utilizada ou transferida, mg/L;

q = inclinação da curva dose-resposta;

n = valor de x interceptado quando N/N₀ = 1 ou Log N/N₀ = 0.

$$D = U \cdot \left(\frac{100}{TE} \right) \quad (2.6)$$

Onde: D = dose de ozônio total necessária, mg/L;

U = dose de ozônio utilizada ou transferida, mg/L;

TE = eficiência da transferência de ozônio, % (faixa típica: 80 a 90%).

As dosagens de ozônio necessárias para suprir a demanda inicial dependerão das características do efluente. Valores típicos usados para as dosagens de ozônio em diferentes tipos de efluentes, com tempo de contato de 15 minutos, são apresentados no Quadro 2.50. Deve-se observar que os valores constantes no quadro servem como estimativa inicial da dosagem necessária (METCALF & EDDY, 2003).

QUADRO 2.50 – DOSAGENS TÍPICAS NECESSÁRIAS PARA ATINGIR A DESINFECÇÃO DE COLIFORMES EM DIFERENTES DIRETRIZES PARA VÁRIOS EFLUENTES, BASEADO EM UM TEMPO DE CONTATO DE 15 MINUTOS

Tipo de Efluente	Contagem inicial de CF, NMP/100mL	Dose de ozônio, mg/L			
		Diretrizes do efluente, NMP/100mL			
		1000	200	23	<2,2
Efluente bruto	10^7 - 10^9	15-40	-	-	-
Efluente primário	10^7 - 10^9	10-40	-	-	-
Efluente de filtro	10^5 - 10^6	4-10	-	-	-
Efluente de lodo ativado	10^5 - 10^6	4-8	4-10	16-30	30-40
Efluente de lodo ativado filtrado	10^4 - 10^6	6-8	4-10	16-25	30-40
Efluente nitrificado	10^4 - 10^6	3-6	4-6	8-20	18-24
Efluente nitrificado filtrado	10^4 - 10^6	3-6	3-8	4-15	15-20
Efluente microfiltrado	10^1 - 10^3	2-6	2-6	3-8	4-8
Efluente de osmose reversa	0	-	-	-	1-2
Efluente de tanque séptico	10^7 - 10^9	15-40	-	-	-
Efluente de filtro de areia intermitente	10^2 - 10^4	4-8	10-15	12-20	16-25

FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003)

2.3.2.5. Tratamento de efluentes

A ozonização pode ser empregada em efluentes que apresentam cor e residuais orgânicos de difícil remoção. Um caso citado pela literatura apresentou um decréscimo de COT no efluente final filtrado, ao passo que a DBO solúvel sofreu aumento de 10 para 40 mg/L devido à conversão de compostos orgânicos de cadeia longa para compostos biodegradáveis. Resultados similares foram obtidos para a ozonização de efluente secundário proveniente de lodos ativados de baixa e alta taxa de indústrias de processamento de tabaco. O Quadro 2.51 mostra os resultados

obtidos. Neste caso, COT não foi reduzido até que o carbono orgânico tivesse sido oxidado para CO₂, enquanto a DQO é reduzida com qualquer oxidação (ECKENFELDER, 1989).

QUADRO 2.51 – RESULTADOS DE OZONIZAÇÃO DE EFLUENTE PROVINDO DE LODOS ATIVADOS DE BAIXA E ALTA TAXA, CLARIFICADO POR DECANTADOR SECUNDÁRIO

Parâmetros	Baixo F/M (0,15) Tempo, min ¹		Alto F/M (0,60) Tempo, min ¹	
	0	60	0	60
DBO mg/L	27	22	97	212
DQO mg/L	600	154	1100	802
pH	7,1	8,3	7,1	7,6
N – Orgânico mg/L	25,2	18,9	40	33
N – NH ₃ mg/L	3,0	5,8	23	25
Cor (Pt-Co)	3790	30	5000	330

FORNTE: ECKENFELDER (1989)

¹ Carga de 155 mg O₃/min

2.3.2.6. Impactos ao meio ambiente

Foi reportado que residuais de ozônio podem ser severamente tóxicos à vida marinha (WARD *et al.*, 1976, citado por: METCALF & EDDY, 2003). No entanto, devido o ozônio dissipar-se rapidamente, residuais deste normalmente não são encontrados no efluente no momento do seu despejo no corpo receptor. Diversas pesquisas têm relatado que a ozonização pode produzir compostos mutagênicos tóxicos ou cancerígenos. Estes compostos são usualmente instáveis, no entanto, e são presentes apenas por questão de minutos na água ozonizada. WHITE (1999, citado por: METCALF & EDDY, 2003) tem reportado que o ozônio destrói certas substâncias orgânicas nocivas tais como ácidos húmicos (precursores da formação de trihalometanos) e malation. Se substâncias tóxicas secundárias são formadas durante a ozonização, isso depende da dose de ozônio, do tempo de contato e da natureza dos compostos precursores. WHITE (1999, citado por METCALF & EDDY, 2003) também tem relatado que o tratamento com ozônio reduz a probabilidade de formação de trihalometanos.

Outro benefício adicional associado ao uso do ozônio para desinfecção é que as concentrações de oxigênio dissolvido no efluente vão ser elevadas próximo aos níveis de saturação com a rápida decomposição do ozônio em oxigênio após a aplicação. Além disso, devido sua rápida decomposição, não permanecerão residuais químicos no efluente tratado que requeira remoção, como é o caso de residuais de cloro (METCALF & EDDY, 2003).

2.3.3. Oxidação Via Dióxido de Cloro

O dióxido de cloro (ClO_2) foi descoberto por Sir Humphrey Davy em 1811, acidificando clorato de potássio com ácido sulfúrico e assim produzindo o gás (RIBEIRO, 2001). Ele foi introduzido na técnica de cloração na década de 30, como alternativa para contornar dificuldades com a cloração relacionadas com os consumidores de água (RICHTER, 1991).

Os principais compostos de cloro usados em plantas de tratamento de efluentes são o cloro elementar (Cl_2), o hipoclorito de sódio (NaOCl), o hipoclorito de cálcio [$\text{Ca}(\text{OCl})_2$], e o ClO_2 . Apesar do cloro estar ligado à desinfecção do efluente, o dióxido de cloro também está sendo usado como oxidante em tratamentos avançados. No passado, o ClO_2 não possuía muita aplicação em tratamento de efluentes devido ao seu alto custo.

As primeiras aplicações do ClO_2 no tratamento das águas tiveram por objetivo a destruição de sabor e odor resultante da presença de compostos fenólicos, matéria orgânica ou algas nestas águas. O interesse pela ação do ClO_2 sobre os microrganismos foi colocado em evidência através das estações de tratamento de água potável na região de Paris, onde o pré-tratamento com ClO_2 é aplicado desde 1953. Este pré-tratamento elimina não somente odor e sabor ofensivos aos sentidos, como melhora o estado e a duração da vida dos filtros impedindo a proliferação dos microrganismos.

O ClO_2 , à temperatura ambiente, é um gás verde amarelado e parece-se com o cloro na aparência e no odor. No estado gasoso, é altamente instável e pode tornar-se explosivo se sua concentração no ar for superior a 10% em volume. Porém, ao contrário do cloro, o ClO_2 não sofre hidrólise em contato com água, permanecendo estável na solução como gás dissolvido sob condições de temperatura inferior a 25°C e ambiente preservado da luz. (JUNLI *et al.*, 1997). Se estas condições não forem obedecidas haverá uma aceleração na decomposição do mesmo, formando clorito e clorato (CAFFARO, 2002).

O ClO_2 é altamente solúvel em água, até mesmo, mais que o cloro e o ozônio. Como o dióxido de cloro é um gás relativamente instável, ele não pode ser comprimido ou liquefeito e deve, assim, ser gerado *in situ* e dissolvido em água. Existem muitos processos de produção de ClO_2 para aplicação em escala real

podendo ser obtido, por exemplo, da oxidação do clorito ou por redução do clorato (CAMARGO, 2004). Um dos processos no qual o ClO_2 é gerado, é o da combinação de uma solução de clorito de sódio com o cloro na relação 2:1, de acordo com as reações químicas 2.1 e 2.2 apresentadas a seguir (RICHTER, 1991):



Até o presente momento, a química completa do ClO_2 em ambiente aquoso não é claramente entendida. Um dos motivos é que o ClO_2 não faz hidrólise de maneira similar a dos compostos de cloro. O poder de oxidação do dióxido de cloro é muitas vezes descrito como “cloro equivalente disponível”. A definição do termo cloro equivalente disponível é baseado na consideração da seguinte meia reação de oxidação do ClO_2 (METCALF & EDDY, 2003):



O ClO_2 é um oxidante energético, tendo poder 250% maior que o cloro (RICHTER, 1991). Possui propriedades bactericidas, esporocidas, virulicidas e algicidas, podendo também, em alguns casos destruir os compostos orgânicos nocivos e oxidar os compostos redutores tais como: sulfatos ou óxidos metálicos. A ação bactericida do ClO_2 tem sido objeto de numerosos estudos, demonstrando-se que permite uma rápida eliminação das bactérias numa gama de pH superior ao do cloro. Para o caso de águas ligeiramente alcalinas, a velocidade de esterilização do dióxido de cloro é superior àquela do cloro.

O ClO_2 se mostra particularmente vantajoso quando a água necessita ficar durante um tempo prolongado nas redes para manter uma qualidade bacteriológica, propiciando residuais muito estáveis ao longo do sistema distribuidor (RICHTER, 1991).

Ainda, o ClO_2 tem uma estabilidade muito maior que o cloro e, sobretudo, maior que o ozônio. Assim, uma água tratada com 0,35 ppm de ClO_2 e conservada na escuridão a 20° C contém ainda, após 48 horas de 0,20 a 0,25 ppm do agente desinfetante. O cloro, nas mesmas condições praticamente desaparece, ao fim de algumas horas e o ozônio por seu lado, tem uma estabilidade de 20 minutos no máximo. Ainda pode-se mencionar que as propriedades oxidantes e desinfetantes do ClO_2 permanecem praticamente inalteradas em uma grande faixa de pH (de 4 a 10). Segundo CAFFARO (2005), a dosagem de ClO_2 requerida para a remoção de

90% de bactérias do grupo coliforme em efluentes sanitários é baixa, estando compreendida numa faixa de 1,5 a 3 mg/L.

2.3.3.1. Aplicações

Atualmente o ClO_2 tem sido aplicado nos seguintes setores e com as seguintes finalidades (PROMINENT, 2005; EXPANSUL, 2005):

- Tratamento de água de rede pública, indústria de alimentos e bebidas:
 - Tratamento de água potável e água industrial;
- Indústria de bebidas:
 - Limpeza de garrafas;
 - Rinsagem das embalagens;
 - Plantas CIP (*cleaning in place*);
 - Tratamento de água em pasteurizadores, refrigeradores e autoclaves;
 - Limpeza de engarrafadora;
- Indústria leiteira:
 - Tratamento do vapor;
- Indústria alimentícia:
 - Tratamento de água onde as frutas e verduras serão lavadas;
 - Tratamento de água utilizada para a preparação de pescados;
 - Frutos do mar ou frangos;
- Indústria papelreira:
 - Eliminando as bactérias existentes na água de recirculação;
- Tratamento de efluentes:
 - Desinfecção;
 - Eliminação ou redução de ferro, manganês, cianetos, cor, sabor e odor;
 - Redução ou eliminação de Trihalometanos (THMs), fenóis, MIB, Geosmina, Ácidos Haloacéticos (HAAs);
 - Oxidação da matéria orgânica.

2.3.3.2. Equipamento

Os equipamentos disponíveis no mercado possuem diferentes características, podendo utilizar produtos químicos diluídos ou concentrados. Os geradores utilizam uma câmara de reação, onde reagentes são misturados formando o ClO_2 . Após criado na câmara de reação, o ClO_2 é direcionado ao ponto de dosagem, podendo ser uma solução concentrada ou diluída, dependendo da necessidade do local de aplicação.

Os sistemas de geração de ClO_2 podem utilizar os seguintes reagentes para a criação do dióxido de cloro (EKA CHEMICALS, 2006; EXPANSUL, 2005):

- Clorito de Sódio + Ácido Clorídrico;
- Clorito de Sódio + Ácido Clorídrico + Hipoclorito de Sódio;
- Clorito de Sódio + Gás Cloro;
- Clorato de Sódio + Peróxido de Hidrogênio + Ácido Sulfúrico.

Algumas décadas de experiência com plantas de ClO_2 têm apresentado uma conversão em torno de 90 a 95%, podendo chegar a 99,9% (EXPANSUL, 2005) de ClO_2 (em relação à proporção estequiométrica) que pode ser alcançada sob condições de operação pré-determinadas. Assim, com a eficiência acima, para gerar 1 grama de ClO_2 são necessários 6 mL de solução de NaClO_2 , 6 mL de HCl e 18,4 mL de água (SODI SCIENTIFICA S.P.A., 1996).

2.3.3.3. Dosagem

Os fatores mais importantes que influenciam a desinfecção da água são: natureza e concentração do agente desinfetante, tempo de contato, temperatura, número e tipo de microrganismos presentes e qualidade da água a ser desinfetada. Pode-se dizer que quanto maior a concentração do desinfetante e o tempo de contato e menor o número de microrganismos e o teor de sólidos suspensos na água, mais efetiva será a desinfecção. A avaliação da eficiência da desinfecção geralmente é baseada no fator CT_D (concentração x tempo), ou seja, a concentração (C, em mg/L) do residual de ClO_2 e o tempo de contato (T, em min) necessário para a inativação da espécie selecionada (BASSANI, 2003).

Através do fator CT_D , em relação a um microorganismo selecionado, é possível comparar a eficiência de remoção via ClO_2 com a eficiência via outros desinfetantes. Quanto mais baixo for o fator CT_D , maior será a ação do desinfetante. Dessa forma é evidente que, quanto mais alto o valor CT_D , mais resistente é o microorganismo em questão. No Quadro 2.52, os valores do fator CT_D estão relacionados com a eficácia de alguns desinfetantes na inativação de 99% dos microorganismos (CAMARGO, 2004).

QUADRO 2.52 – VALORES DO FATOR CT_D (MG.MIN/L) DE ALGUNS DESINFETANTES PARA REMOÇÃO DE 99% DOS MICRORGANISMOS

Microorganismo	Cloro (pH = 6-7)	Cloramina (pH = 8-9)	Dióxido de Cloro (pH = 6-7)	Ozônio (pH = 6-7)
<i>Escherichia coli</i>	0,034-0,05	95-180	0,4-0,75	0,02
Polivírus 1	1,1-2,5	768-3740	0,2-6,7	0,1-0,2
Rotavírus	0,01-0,05	3806-6476	0,2-2,1	0,006-0,06
Cistos de <i>Giardia lamblia</i>	47-150	2200	26	0,5-0,6
Cistos de <i>Giardia muris</i>	30-630	1400	7,2-18,5	1,8-2,0
<i>Cryptosporidium parvus</i>	7200	7200	78	5-10

FONTE: Adaptado de CAFFARO (2005)

METCALF & EDDY (2003) cita que a dosagem do ClO_2 depende do pH e do tipo de microorganismo, alvo da desinfecção. No Quadro 2.53 são apresentados valores de CT_D relativos à inativação de bactérias, vírus e cistos de protozoários relativos ao uso de ClO_2 .

QUADRO 2.53 – FAIXA ESTIMADA DO FATOR CT_D DO DIÓXIDO DE CLORO PARA VÁRIOS NÍVEIS DE INATIVAÇÃO DE BACTÉRIAS, VÍRUS E CISTOS DE PROTOZOÁRIOS EM EFLUENTE SECUNDÁRIO FILTRADO (PH \approx 7 E T \approx 20°C)

Microorganismo	unidade	Inativação			
		1-Log	2-Log	3-Log	4-Log
Bactéria	mg.min/L	2-4	8-10	30-30	50-70
Vírus	mg.min/L	-	2-4	6-12	12-20
Cistos de protozoários	mg.min/L	7-9	14-16	20-25	-

FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003)

Estes valores do Quadro 2.53 podem ser usados como ponto de partida. Em geral, a efetividade do ClO_2 é similar ao do cloro combinado para inativação das bactérias. No entanto, existe uma diferença significativa de efetividade do ClO_2 para a desinfecção de vírus, que é essencialmente a mesma que a do cloro livre. Já na inativação de cistos de protozoários o ClO_2 aparenta ser mais efetivo que o cloro livre (METCALF & EDDY, 2003).

2.3.3.4. Tratamento de efluentes

Estudos realizados por CAMARGO (2004) em efluentes sanitários provindos de sistema de lodos ativados por aeração prolongada, apresentaram dosagens de 2,0, 2,5 e 3,0 mg ClO_2/L que levaram a 100% da remoção de coliformes fecais em tempos de 20, 15 e 10 minutos respectivamente atendendo as normativas vigentes para coliformes. A pesquisa utilizou tanque de contato com fluxo pistão de $11,00\text{m}^3$ com possibilidade de coleta em seis pontos, proporcionando tempos de contato variando de 5 a 30 minutos. No entanto, para os parâmetros físico-químicos analisados no trabalho (pH, cor e DQO), as doses de 2,5 e 3,0 mg ClO_2/L deixaram o pH abaixo da faixa entre 6 e 9 conforme determina a norma NBR 13.969 da ABNT (1997). Estas mesmas concentrações também ultrapassaram o limite de 0,8 mg ClO_2/L para dióxido de cloro residual conforme normas ditadas pela US EPA (1994).

Conseqüentemente, a dosagem de ClO_2 mais adequada para atingir 100% de remoção de coliformes fecais do esgoto considerado foi 2,0 mg ClO_2/L , dado que atendeu o valor permitido pela EPA de ClO_2 residual e os padrões bacteriológicos e de pH da normativa da ABNT (CAMARGO, 2004). Deve-se observar que estes resultados são consistentes com os obtidos por JUNLI *et al.* (1997), que evidenciaram uma remoção de coliformes fecais de 99,9% num tempo de contato de 20 minutos utilizando uma concentração de ClO_2 de 2,0 mg/L.

Para o caso do estudo de desinfecção realizado por RIBEIRO (2001) em efluentes sanitários provenientes de lagoas de estabilização, este precisou de uma dose de 6,46 mg ClO_2/L e um tempo de contato de 10 minutos para atingir a mesma remoção. Esta dose superior foi devido ao esgoto desinfetado proceder de lagoas de estabilização e, conseqüentemente, possuir um teor relativamente alto de sólidos suspensos que elevam o consumo de desinfetante.

Para o presente trabalho a tendência é que os valores das doses de ClO_2 estejam mais próximos do estudo de Ribeiro que ao de Camargo, uma vez que o efluente em estudo provém de duas lagoas aeradas em série e uma lagoa de polimento e que a finalidade principal da tecnologia será a oxidação do efluente, reduzindo parâmetros como DQO, DBO_5 , COT, SST, cor e turbidez para reúso interno, sendo a desinfecção uma conseqüência positiva já prevista e necessária do tratamento.

2.3.3.5. Impactos ao meio ambiente

Os impactos ambientais associados ao uso do ClO_2 como desinfetante de efluentes não são muito bem conhecidos. Tem sido relatado que estes impactos são menores que aqueles associados à cloração. O ClO_2 não se dissocia ou reage com água como faz o cloro. No entanto, devido sua produção ser de cloreto de sódio e cloro, o cloro livre pode permanecer como resultado da solução de dióxido de cloro (dependendo do processo) e o ambiente aquático receber este impacto, como faz o cloro residual. Um residual de dióxido de cloro pode então permanecer, mas ele tem sido menos prejudicial para a vida aquática que o cloro (METCALF & EDDY, 2003).

Segundo a ATSDR (2004), os impactos do dióxido de cloro são minimizados no meio ambiente devido:

- O dióxido de cloro ser um composto muito reativo e se degrada rapidamente no ambiente;
- No ar, a luz solar degrada rapidamente o dióxido de cloro a cloro gasoso e oxigênio;
- Na água, o dióxido de cloro rapidamente forma clorito;
- O clorito na água pode passar para a água subterrânea, ainda que reações com o solo e sedimentos possam reduzir a quantidade de clorito que alcança as águas subterrâneas;
- Nem o dióxido de cloro nem o clorito se acumulam na cadeia alimentar.

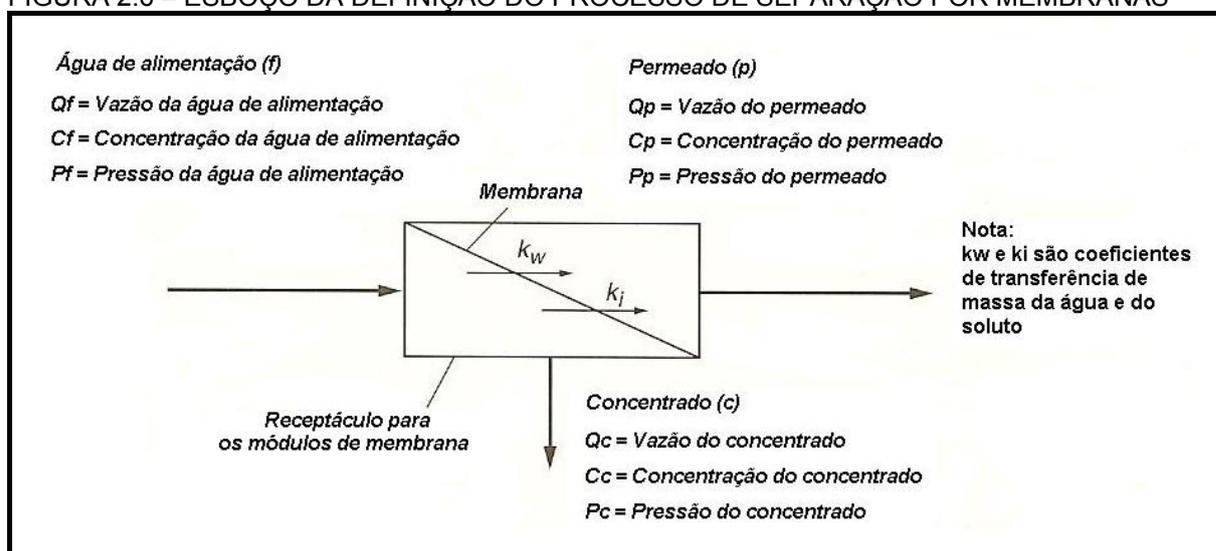
2.3.4. Processo de Separação por Membranas – Osmose Reversa

Segundo APTEL & BUCKLEY (1996, citado por: MANCUSO e SANTOS, 2003), membranas semipermeáveis são filmes que separam duas fases, e que agem como uma barreira seletiva à passagem de algum tipo de matéria.

O processo de separação por membranas (SPM) se baseia em mecanismos físicos, isto é, não envolvendo processos químicos, biológicos ou trocas térmicas. Refere-se, apenas, a separação dos componentes de uma mistura pela rejeição daqueles que não possuem tamanho para atravessar os poros da membrana e a eficiência deste tipo de filtração depende inteiramente da diferença de tamanho entre o poro e a partícula a ser removida (ECKENFELDER, 1989).

A separação por membranas semipermeáveis pode ser entendida como uma operação em que o fluxo de alimentação é dividido em dois: o permeável, contendo o material que passou através da membrana e o rejeito ou concentrado que contém o material que não passou através da membrana, ou seja, o subproduto do processo (MANCUSO e SANTOS, 2003). A vantagem destas tecnologias é que o rejeito pode ser reincorporado ao efluente a ser tratado para passar novamente pela membrana. Após muitas operações desta natureza o efluente torna-se muito concentrado, necessitando assim, de um descarte deste para que o efluente fique com a concentração original de tratamento. A Figura 2.6 apresenta de forma resumida um esboço de como ocorre o processo de separação por membranas.

FIGURA 2.6 – ESBOÇO DA DEFINIÇÃO DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS



FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003)

A SPM ainda possui características que a torna especialmente interessante em relação a outras tecnologias, podendo citar (MANCUSO e SANTOS, 2003):

- A operação é executada à temperatura ambiente, sem a necessidade de troca de fase, como ocorre com a destilação;
- Não necessita de regeneração, como ocorre com resinas trocadoras de íons;
- Não necessita de aditivos químicos, como ocorre com a destilação azeotrópica.

2.3.4.1. Classificação dos processos de separação por membranas

Os processos de separação por membranas incluem a microfiltração (MF), a ultrafiltração (UF), a nanofiltração (NF) a osmose reversa (OR), a diálise (DI) e a eletrodiálise (ED). Os processos de SPM também podem ser classificados de outras formas incluindo: (1) a natureza da força motriz, (2) o tipo de material que a membrana é feita, (3) o mecanismo de separação, e (4) pelo tamanho nominal com que se queira atingir a separação (WAGNER, 2001; METCALF & EDDY, 2003). As características gerais dos principais processos de separação por membranas, incluindo suas faixas de operação, são relacionadas nos Quadros 2.54 e 2.55.

Deve-se salientar que as separações por MF, UF, NF e OR utilizam a pressão como força motriz, enquanto na diálise o processo de transporte de constituintes ocorre através de uma membrana semipermeável onde a força motriz resultante é a diferença de concentração. A passagem de íons e substâncias de baixos pesos moleculares ocorre ao mesmo tempo em que ocorre a rejeição de solutos e colóides com altos pesos moleculares (MANCUSO e SANTOS, 2003).

No caso da eletrodiálise, a separação envolve uma força eletromotriz que gera uma diferença de potencial elétrico nas membranas catiônica e aniônica. Nestas condições os cátions passam pelas membranas trocadoras de cátions e os ânions pelas membranas trocadoras de ânions, provocando uma diminuição na salinidade num compartimento e um aumento no seguinte e, assim, sucessivamente ao longo de todo o equipamento (MANCUSO e SANTOS, 2003). A eletrodiálise não é indicada para efluentes que contenham compostos moleculares e substâncias em suspensão como contaminantes (MIERZWA, 2005).

A classificação por tipo de material e configuração da membrana acontece da seguinte forma: (1) no que se refere aos materiais de fabricação estes podem ser sintéticos orgânicos ou sintéticos inorgânicos. Dentro dos materiais orgânicos, os polímeros mais conhecidos são o acetato de celulose, poly ou Normex, polieterimida, poliacrilonitrila, polysulfona, Teflon[®], polietileno, policarbonato e polipropileno. Já as membranas sintéticas inorgânicas são construídas com materiais resistentes à ataques químicos, térmicos e mecânicos sendo feitas de materiais metálicos, cerâmicos, vítreos, entre outros (ver Quadro 2.55). Tipicamente, as membranas utilizadas em tratamento de efluente são de material sintético

orgânico. A classificação por configuração (2) refere-se à forma com que a membrana se apresenta, podendo ser de forma tubular, fibras ocas, enroladas em espiras e em placas planas (ECKENFELDER, 1989; WAGNER, 2001; MANCUSO e SANTOS, 2003; METCALF & EDDY, 2003).

Os mecanismos de separação podem se dar por três efeitos: (1) de peneiramento, para o caso de membranas porosas os diâmetros de poros variam de <2 nm (microporos), entre 2-50 nm (mesoporos) e >50 nm (macroporos), (2) por efeito de diferença de solubilidade e capacidade de difusão das substâncias na membrana, e (3) por efeito eletromecânico decorrente das diferenças de cargas das espécies que estão sendo separadas (MANCUSO e SANTOS, 2003).

QUADRO 2.54 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS PROCESSOS DE MEMBRANAS.

Tipo de Processo	Força atuante na membrana	Tipo de Mecanismo de separação	Estrutura de operação (tam. poro)	Faixa típica de operação (μm)	Descrição do permeado	Tipos de elementos removidos
Microfiltração	Diferença de pressão hidrostática ou vácuo	Filtro	Macroporos (>50nm)	0.08 – 2.0	Água + solutos dissolvidos	SST, Turbidez, protozoários, oócitos, cistos, algumas bactérias e vírus.
Ultrafiltração	Diferença de pressão hidrostática	Filtro	Mesoporos (2-50nm)	0.005 – 0.2	Água + pequenas moléculas	Macromoléculas, colóides, a maioria das bactérias e alguns vírus, proteínas
Nanofiltração	Diferença de pressão hidrostática	Filtro + Dissolução, difusão + exclusão ou separação	Microporos (<2nm)	0.001 – 0.01	Água + pequenas moléculas, íons dissolvidos	Pequenas moléculas, dureza e vírus.
Osmose Reversa	Diferença de pressão hidrostática	Dissolução, difusão + exclusão ou separação	Denso/opaco (<2nm)	0.0001 – 0.001	Água, pequenas moléculas, íons dissolvidos	Moléculas muito pequenas, cor, dureza, sulfatos, nitratos, sódio, outros íons.
Diálise	Diferença de concentração	Difusão	Mesoporos (2-50nm)	--	Água + pequenas moléculas	Macromoléculas, colóides, a maioria das bactérias e alguns vírus, proteínas.
Eletrodiálise	Força eletromotriz	Troca iônica com seleção de membranas	Microporos (<2nm)	--	Água + íons dissolvidos	Íons de sais ionizados.

FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003).

Para o caso da classificação por separação nominal por tamanho, esta classificação está diretamente ligada ao mecanismo de separação por peneira, onde

o tamanho dos poros tem importância fundamental no processo de separação. No caso da OR, como o tamanho dos poros é muito pequeno, a membrana é definida como densa (MANCUSO e SANTOS, 2003; METCALF & EDDY, 2003).

Existem algumas outras operações de separação por membranas que ainda possuem pouca utilização, que são chamadas de operações por permeação, as quais se podem citar: a permeação gasosa, a difusão gasosa, a pervaporação, membrana para arraste ou *stripping* e a destilação por membranas (MANCUSO e SANTOS, 2003).

QUADRO 2.55 – CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DAS TECNOLOGIAS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS USADAS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES

Tecnologia de membrana	Faixa típica de operação, μm	Pressão de operação, kPa	Taxa de fluxo, $\text{L/m}^2\cdot\text{d}$	Particularidades da membrana	
				Tipo	Configuração
Microfiltração	0,08 – 2,0	7 – 100 (usual: 100)	405-1600	Polipropileno, acrilonitrile, nylon e politetrafluoretileno	Enrolada em espiral, fibra oca e placa plana.
Ultrafiltração	0,005 – 0,2	70 – 700 (usual: 525)	405 - 815	Acetato de celulose e poliamida aromática	Enrolada em espiral, fibra oca e placa plana.
Nanofiltração	0,001 – 0,01	500 – 1000 (usual: 875)	200 - 815	Acetato de celulose e poliamida aromática	Enrolada em espiral e fibra oca.
Osmose reversa	0,0001 – 0,001	850 – 7000 (usual: 2800)	320 - 490	Acetato de celulose e poliamida aromática	Enrolada em espiral, fibra oca e composto de filme fino.

FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003)

2.3.4.2. Pré-tratamento da água de alimentação

Conforme observado no Quadro 2.54 a nanofiltração e a osmose reversa são as formas mais eficientes de separação por membranas. No entanto, para estas duas modalidades de tratamento, é necessário que o efluente de entrada possua alta qualidade, pois a membrana da unidade de filtração pode ser contaminada por material coloidal e outros constituintes em excesso danificando ou inutilizando a mesma. Algumas opções de pré-tratamento para o efluente de entrada são sugeridas para evitar maiores problemas com a membrana, conforme segue (METCALF & EDDY, 2003):

- Pré-tratamento do efluente secundário com coagulação/floculação, decantação e filtração;

- Filtros de cartucho com tamanho dos poros variando de 5 a 10 μ m reduzem o residual de sólidos suspensos;
- Para limitar a atividade bacteriana sugere-se a desinfecção do efluente com cloro, ozônio ou Raios U.V.;
- A exclusão de oxigênio do efluente pode ser necessária para prevenir a oxidação do ferro, manganês e do ácido sulfídrico;
- Dependendo do tipo de membrana, a remoção de ferro e manganês também pode ser necessária para reduzir o potencial de incrustação na membrana;
- Para inibir a formação de incrustação, o pH do efluente deve ser ajustado dentro da faixa de 4,0 a 7,5.

2.3.4.3. *Fouling*

O termo *fouling* é usado para descrever o potencial de disposição e acumulação de constituintes na membrana provindos da água de alimentação. O *fouling* em membranas pode ocorrer devido a três situações (METCALF & EDDY, 2003):

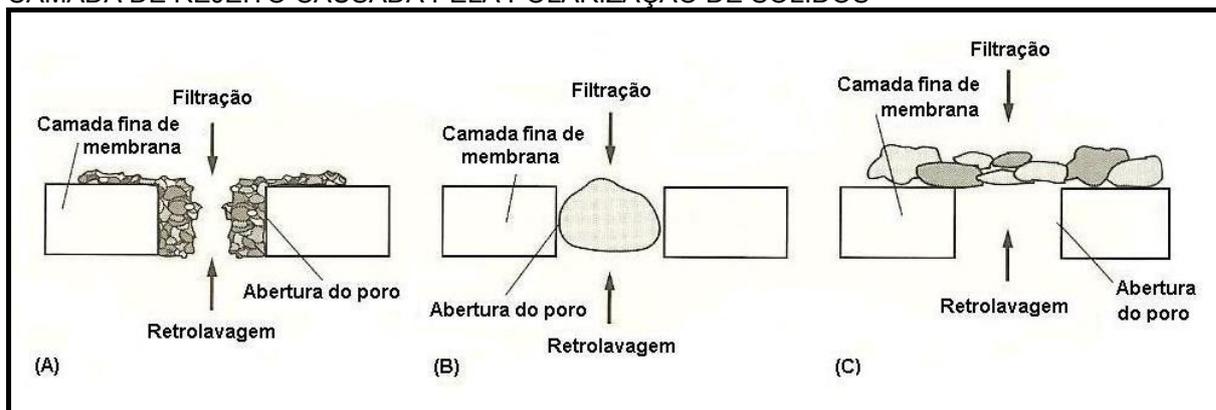
- Deposição e acúmulo de constituintes na superfície da membrana provindos da água de alimentação;
- A formação de precipitado químico devido à composição química da água de alimentação, e;
- Dano na membrana devido à presença de substâncias químicas que possam reagir com a membrana ou agentes biológicos que possam colonizar a superfície da membrana.

No caso específico de redução do fluxo causado por *fouling* provindo do acúmulo de sólidos na membrana (ver Figura 2.7), estes são causados por: (1) estreitamento dos poros, (2) entupimentos dos poros, e (3) formação de gel ou camada de rejeito causada pela polarização da concentração de sólidos (AHN *et al.*, 1998, citado por: METCALF & EDDY, 2003).

O controle do *fouling* em membranas pode ocorrer de três formas: (1) fazendo o pré-tratamento da água de alimentação (conforme item 2.3.4.1), (2) fazendo retrolavagem da membrana e (3) fazendo a limpeza química da membrana. O pré-

tratamento é usado para redução de SST e bactérias, enquanto a retrolavagem serve para eliminar o acúmulo de material na superfície da mesma. Já o tratamento químico é usado para remover constituintes que não são removidos pela retrolavagem (METCALF & EDDY, 2003).

FIGURA 2.7 – TIPOS DE *FOULING* EM MEMBRANAS CAUSADO POR ACÚMULO DE SÓLIDOS: (A) ESTREITAMENTO DO PORO, (B) ENTUPIIMENTO DO PORO, E (C) FORMAÇÃO DE GEL OU CAMADA DE REJEITO CAUSADA PELA POLARIZAÇÃO DE SÓLIDOS



FONTE: Adaptado de BOURGEOUS *et al.* (1999)

2.3.4.4. Aplicações

A preocupação com a saúde e o desenvolvimento de novas e mais baratas membranas, proporcionou um dramático crescimento nos últimos cinco anos na aplicação das tecnologias de separação por membranas no campo da engenharia ambiental. O aumento do uso das membranas tende a continuar no futuro e o uso de tecnologias de filtração convencionais podem se tornar coisa do passado em dez ou quinze anos, especialmente à luz da necessidade de se remover constituintes orgânicos resistentes ao tratamento convencional (METCALF & EDDY, 2003). As aplicações típicas para o uso da MF, UF, NF e OR no tratamento de efluentes são descritos no Quadro 2.56 a seguir e as faixas típicas de operação em termos de pressão e taxa de fluxo e os tipos de membranas usadas também podem ser vistos no Quadro 2.55.

Uma tendência importante que deve ser salientada é que os valores para pressões de operação dos sistemas de SPM são considerados mais baixos se comparados com valores de cinco anos atrás (ver Quadro 2.53). Isto é uma antecipação de que as pressões de operação vão continuar a diminuir com o desenvolvimento de novas membranas (METCALF & EDDY, 2003).

QUADRO 2.56 – APLICAÇÕES TÍPICAS DAS TECNOLOGIAS DE MEMBRANA

Aplicação	Descrição
Microfiltração e Ultrafiltração	
Tratamento biológico aeróbio	A membrana é usada para separar o efluente tratado da biomassa em suspensão de processos de lodos ativados. A unidade de SPM pode ser imersa dentro do bioreator de lodos ativados ou pode ficar fora. Estes processos são conhecidos como processo bioreator-membrana.
Tratamento biológico anaeróbio	A membrana é usada para separar o efluente tratado da biomassa em suspensão em um reator anaeróbio.
Tratamento biológico de aeração por membranas	Membranas tipo placa plana, tubular e ocas são usadas para transferir oxigênio puro para a biomassa fixa do lado de fora da membrana. Estes processos são conhecidos como processo de aeração por membrana em bioreator.
Tratamento biológico de extração por membranas	Membranas são usadas para extrair moléculas orgânicas degradáveis de constituintes inorgânicos como ácidos, bases e sais de efluente de tratamento biológico. Estes processos são conhecidos como processo de extração por membrana em bioreator.
Pré-tratamento para desinfecção	Usado para remover residual de sólidos suspensos de efluente secundário decantado ou de efluentes provindos de filtração superficial ou profunda com o objetivo de atingir desinfecção efetiva utilizando cloro ou radiação UV (aplicação em reúso).
Pré-tratamento para nanofiltração e osmose reversa	Microfiltros são usados para remover o residual coloidal e os sólidos suspensos como pré-tratamento de um processo mais restritivo.
Nanofiltração	
Reúso de Efluente	Usado pra tratar efluente pré-filtrado (normalmente com microfiltração) para aplicações de reúso potável indireto como a injeção do efluente em águas subterrâneas. É apropriada a desinfecção do efluente quando se usa nanofiltração.
Abrandamento de Efluente	Usado para reduzir a concentração de íons multivalentes, que contribuem para a dureza de específicas aplicações de reúso.
Osmose reversa	
Reúso de Efluente	Usado para tratar efluente pré-filtrado (normalmente com microfiltração) para aplicações de reúso potável indireto como a injeção do efluente em águas subterrâneas. É apropriada a desinfecção do efluente quando se usa osmose reversa.
Dispersão do Efluente	O processo de osmose reversa demonstra capacidade de remover grandes amostras de compostos seletos, tais como NDMA - <i>N</i> -nitrosodimethylamne.
Tratamento em dois estágios para uso em caldeiras	Usando osmose reversa em dois estágios é possível produzir água adequada para uso em caldeiras de alta pressão.

FONTE: Adaptado em parte de STEPHENSON *et al.*, 2000 (citado por METCALF & EDDY, 2003)

2.3.4.5. Tratamento de efluentes

Um estudo realizado no final da década de 90 e início dos anos 2000 na região de Dublin San Ramon, EUA, comprovou a eficiência do tratamento de efluentes sanitários municipais usando membranas para produção de água utilizada em aplicações específicas e também água de reúso.

O sistema utilizava como pré-tratamento a microfiltração, em substituição à filtração convencional, para redução de turbidez, remoção de residuais de sólidos

suspensos e redução de bactérias para limitar o crescimento bacteriológico nas membranas de osmose reversa, que era o passo seguinte do tratamento.

O desempenho do sistema de microfiltração é apresentado no Quadro 2.57, onde se pode constatar que a microfiltração teve alto desempenho na redução de turbidez, SST e DBO e ainda um bom desempenho na redução de DQO e COT. Todos os índices estavam dentro da faixa proposta pela literatura, comprovando sua utilidade como pré-tratamento para a osmose reversa.

QUADRO 2.57 – RESUMO DA PERFORMANCE DO USO DE MICROFILTRAÇÃO EM ESGOTO SANITÁRIO DA REGIÃO DE DUBLIN SAN RAMON COMO PRÉ-TRATAMENTO DE OSMOSE REVERSA ENTRE 04/2000 E 12/2000⁽¹⁾

Constituinte	Afluente da MF mg/L	Efluente da MF mg/L	Média de redução, %	Redução relatada na literatura, %
COT	10 – 31	9 – 16	57	45 – 65
DBO	11 – 32	<2 – 9,9	86	75 – 90
DQO	24 – 150	16 – 53	76	70 – 85
SST	8 – 46	<0,5	97	95 – 98
SDT	498 – 622	498 – 622	0	0 – 2
NH ₃ -N	21 – 42	20 – 35	7	5 – 15
NO ₃ -N	<1 – 5	<1 – 5	0	0 – 2
PO ₄ ²⁻	6 – 8	6 – 8	0	0 – 2
SO ₄ ²⁻	90 – 120	90 – 120	0	0 – 1
Cl ⁻	93 – 115	93 – 115	0	0 – 1
Turbidez	2 – 50 NTU	0,03 – 0,08 NTU	>99	

FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003)

⁽¹⁾ Vazão típica para o período do teste foi de 1.600 L/m².d

Após ser tratado por MF o efluente gerado era encaminhado diretamente como afluente do sistema de OR. Este efluente pré-tratado recebia especial atenção para se manter desinfetado, evitando assim o *fouling*. O desempenho do sistema de osmose reversa é apresentado no Quadro 2.58, onde se pode constatar o alto desempenho do sistema, chegando a mais de 95% de eficiência em quase todos os parâmetros analisados, com exceção do COT com 94%, da DQO com 91%, da turbidez com 50% e da DBO com 40%. Neste caso, novamente todos os parâmetros estiveram dentro da faixa de remoção proposta pela literatura.

QUADRO 2.58 – RESUMO DA PERFORMANCE DO USO DE OSMOSE REVERSA EM ESGOTO SANITÁRIO DA REGIÃO DE DUBLIN SAN RAMON ENTRE 04/1999 E 11/1999⁽¹⁾

Constituinte	Afluente da O.R. mg/L	Efluente da O.R. mg/L	Média de redução, %	Redução relatada na literatura, %
COT	9 – 16	<0,5	>94	85 – 95
DBO	<2 – 9,9	<2	>40	30 – 60
DQO	16 – 53	<2	>91	85 – 95
SST	<0,5	~0	>99	95 – 100
SDT	498 – 622	10 – 31	>97	90 – 98
NH ₃ -N	20 – 35	1 – 3	96	90 – 98
NO ₃ -N	<1 – 5	0,08 – 3,2	96	65 – 85
PO ₄ ²⁻	6 – 8	0,1 – 1	≈99	95 – 99
SO ₄ ²⁻	90 – 120	<0,5 – 0,7	99	95 – 99
Cl ⁻	93 – 115	0,9 – 5,0	97	90 – 98
Turbidez	0,03 – 0,08 NTU	0,03 NTU	50	40 – 80

FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003)

⁽¹⁾ Vazão típica para o período do teste foi de 348 L/m².d

2.3.4.6. Disposição do concentrado de efluentes e seus impactos

A disposição de concentrados produzidos por processo de separação por membranas representa o maior problema que deve ser considerado no uso destas aplicações. Os principais métodos usados atualmente para disposição de concentrados são apresentados no Quadro 2.59.

QUADRO 2.59 – OPÇÕES PARA DISPOSIÇÃO DE CONCENTRADO DE ÁGUA SALGADA PROVINDO DE PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

Opção de disposição	Descrição
Descarga no oceano	Esta disposição é uma opção de escolha de indústrias localizadas na costa dos EUA. Normalmente, uma linha subterrânea é usada para promover as descargas de concentrado. Descarga combinada com água de resfriamento de usinas de energia tem sido usada na Flórida. Em localidades do interior se fazem necessários caminhões, ferrovias ou tubulações para transportar o concentrado.
Descarga nas águas superficiais	Descarga do concentrado em águas superficiais é o método mais comum de disposição do concentrado proveniente de água salgada.
Aplicação no solo	A aplicação no solo tem sido usada para alguns tipos de concentrado com baixa concentração de sais.
Descarga no sistema de coleta de esgotos	Esta opção é adequada apenas para pequenas descargas, as quais não aumentem significativamente os SDT (Ex.: menor que 20 mg/L).
Injeção em poços artesianos	Depende se a água subsuperficial do aquífero é salobra ou se ela não for apropriada para uso doméstico.
Lagoas de evaporação	São necessárias grandes áreas superficiais em locais fora das faixas tropicais e subtropicais.
Evaporação térmica controlada	Apesar do intenso uso de energia, a evaporação térmica pode ser a única opção disponível em muitas áreas.

FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003)

Enquanto pequenas instalações industriais podem dispor seus concentrados misturando com vazões de outros efluentes, este procedimento não é apropriado

para grandes indústrias. O concentrado provindo de processos como nanofiltração e osmose reversa podem conter dureza, metais pesados, orgânicos com alto peso molecular, microrganismos e muitas vezes ácido sulfídrico. O pH normalmente é alto devido à concentração de alcalinidade, a qual aumenta a probabilidade de precipitação de metais em poços de descarte. A qualidade e a quantidade de concentrado produzido por nanofiltração, osmose reversa e eletrodialise podem ser estimadas usando as Equações 2.7, 2.8, 2.9 e 2.10 apresentadas a seguir (METCALF & EDDY, 2003).

A taxa de recuperação é definida por:

$$r, \% = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100 \quad (2.7)$$

Onde: Q_p = Fluxo do permeado, kg/s;

Q_f = Fluxo de alimentação, kg/s.

Deve-se notar que existe uma diferença entre a taxa de recuperação (que se refere à água) e a taxa de rejeição (que se refere ao soluto) a qual é dada abaixo:

$$R, \% = \frac{C_f - C_p}{C_f} \times 100 \quad (2.8)$$

Os balanços de massa correspondentes são:

$$Q_f = Q_p + Q_c \quad (2.9)$$

$$Q_f \cdot C_f = Q_p \cdot C_p + Q_c \cdot C_c \quad (2.10)$$

ECKENFELDER (1989) cita que o fator de recuperação da água pode estar na faixa de 75 a 90%, com resultados práticos em torno de 80% e a taxa de rejeição entre 85 e 99,5%, com valor típico de 95%. Enquanto para WAGNER (2001), a taxa de recuperação de água por passagem no sistema de osmose reversa, na prática, é de 75%.

2.3.5. Processo de Coagulação, Floculação e Sedimentação

Em tratamento de água e efluentes a finalidade da coagulação, floculação e sedimentação consistem em transformar as impurezas que se encontram em suspensão fina, em estado coloidal ou em solução, bactérias, protozoários e plâncton em partículas maiores (flocos) para que possam ser removidas por

sedimentação, filtração ou ainda por flotação (AZEVEDO NETTO, *et al.*, 1979). Os procedimentos e características de cada etapa deste processo são descritos a seguir.

2.3.5.1. Coagulação

O processo de coagulação tem como principal objetivo neutralizar as cargas elétricas das partículas em suspensão, normalmente negativas, por meio da adição de compostos químicos com cargas positivas, como sais de ferro, sais de alumínio e polímeros, neutralizando assim suas cargas superficiais e proporcionando a formação de flocos densos em condição de decantar (NALCO, 1988; SANTOS FILHO, 1976).

Geralmente as partículas coloidais presentes na água apresentam os maiores problemas quando se visa a remoção de cor e turbidez. Isso se deve às propriedades eletrocinéticas dos colóides e também às características conseqüentes da dimensão reduzida das partículas (AZEVEDO NETTO, *et al.*, 1979).

Um entendimento das técnicas de coagulação e floculação deve levar em consideração os vários tipos de dispersões coloidais, principalmente aquela em que se tem uma fase sólida, dispersa em uma fase líquida; mais particularmente ainda, quando se tem, como fase dispersante a água. No caso de tratamento de água é importante considerar os colóides hidrófilos e hidrófobos (AZEVEDO NETTO, *et al.*, 1979).

Os colóides hidrófilos são compostos de grupos polares, solúveis em água, que atraem para próximo de si, moléculas do meio dispersante, formando uma película que exerce ação protetora, tornando os colóides bastante estáveis dificultando sua coagulação e floculação. Graxas, óleos, sabões e detergentes pertencem a este grupo, quando dispersos em água.

Colóides hidrófobos não têm afinidade com a água, pois sua fase dispersa é constituída de material insolúvel em água. Esses colóides geralmente ocorrem em maior quantidade que os hidrófilos em meio aquoso. Suas propriedades eletrocinéticas estão relacionadas ao Potencial Zeta.

A condição ótima de coagulação vai ocorrer quando o Potencial Zeta for zero: isto é definido como ponto isoelétrico. A coagulação em termos práticos usualmente

ocorre dentro de uma faixa deste potencial que varia entre $\pm 0,50$ mV (ECKENFELDER, 1989), apesar de notar-se tendência de aglomeração à medida que o Potencial Zeta atinge 10 mV ou menos.

Para se ter uma boa coagulação, deve-se efetuar o experimento em pH adequado, que é chamado de pH ótimo, ao qual este fenômeno ocorre no menor espaço de tempo e com uma dosagem de coagulante relativamente pequena. Produtos químicos como cal hidratada, carbonato de cálcio, carbonato de sódio, hidróxido de sódio, gás carbônico, ácido clorídrico e ácido sulfúrico são empregados para o ajuste do pH.

A alcalinidade também possui importância indiscutível no tratamento químico de água e efluentes. Quando a água não possui alcalinidade ideal para coagulação costuma-se adicionar álcalis como a cal virgem (CaO), cal hidratada (Ca(OH)₂) e barrila (Na₂CO₃) para promovê-la e mantê-la nos níveis ideais (AZEVEDO NETTO, *et al.*, 1979).

Existem vários tipos de coagulantes disponíveis no mercado, porém os mais conhecidos e utilizados estão divididos em quatro grandes categorias: cal; sais de alumínio, tal como sulfato de alumínio, aluminato de sódio, cloreto de alumínio; sais de ferro como sulfato férrico, cloreto férrico e sulfato ferroso e polímeros.

O hidróxido de cálcio (cal) é utilizado como coagulante, apesar de ele não ser considerado um coagulante verdadeiro. Este pode reagir com a alcalinidade do bicarbonato e precipitar o carbonato de cálcio e com orto-fosfato para precipitar hidroxiapatita de cálcio (ECKENFELDER, 1989), além de reduzir sólidos suspensos, a turbidez, a concentração de metais pesados e a população de vírus e bactérias. O efluente tratado com cal apresenta alto pH, mas este pode ser diminuído por recarbonatação ou por adição de ácido. As dosagens requeridas dependem basicamente da dureza e da alcalinidade da água, sendo normais doses variando entre 200 e 400 mg/L, em pH em torno de 11,0 (MANCUSO e SANTOS, 2003).

O sal de alumínio normalmente utilizado é o sulfato de alumínio, que reage tanto com alcalinidade como com fósforo, além de possuir baixo custo, fácil transporte e manejo e grande disponibilidade. A dosagem necessária de sulfato de alumínio para remoção de fósforo, por exemplo, é maior que a estequiometricamente requerida, em razão da reação com a alcalinidade

(MANCUSO e SANTOS, 2003). Este produto tem reação ácida, consumindo a alcalinidade natural da água, sendo que cada ppm adicionado reduz o pH da água numa proporção de 0,45 (AZEVEDO NETTO, *et al.*, 1979).

Os sais de ferro, principalmente o cloreto férrico, são bastante eficientes na remoção de sólidos suspensos e fósforo do efluente. Estes sais normalmente são dosados conjuntamente com a cal ou hidróxido de sódio, que ajudam na produção dos flocos e aumentam o pH da água. O cloreto férrico produz bons flocos em amplo intervalo de pH e sua dosagem para permitir a precipitação de hidróxidos é cerca de 10 mg/L (MANCUSO, 2003). O sulfato ferroso é muito útil para tratar águas que apresentam pH elevado, enquanto que o sulfato férrico é conveniente para o tratamento de águas altamente coloridas ou ácidas (AZEVEDO NETTO, *et al.*, 1979).

Em geral, aumentando-se gradualmente a concentração dos coagulantes, nota-se um incremento na velocidade de formação de flocos, mas o aumento excessivo pode produzir a inversão do Potencial Zeta, inferindo de maneira contrária ao que se observa inicialmente (AZEVEDO NETTO, *et al.*, 1979). O Quadro 2.60 apresenta algumas características de alguns tipos de coagulantes utilizados no tratamento de água e efluentes.

QUADRO 2.60 – PRODUTOS QUÍMICOS INORGÂNICOS MAIS USADOS PARA COAGULAÇÃO EM PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUA E EFLUENTES

Substância química	Fórmula	Forma disponível	pH	Dosagem (ppm)	pH de atuação
Sulfato de alumínio	$Al_2(SO_4)_3$	Líquido e massa sólida	3,5	20 a 60	5,5 a 7,0
Cloreto de alumínio	$AlCl_3$	Líquido	(1)	(1)	(1)
Hidróxido de cálcio (cal)	$Ca(OH)_2$	Pó e pasta	(1)	(1)	(1)
Cloreto férrico	$FeCl_3$	Líquido e massa sólida	3 a 4	30 a 80	8,0 a 9,4
Sulfato férrico	$Fe_2(SO_4)_3$	Granular	3 a 4	30 a 80	8,0 a 9,4
Sulfato ferroso	$Fe_2SO_4 \cdot 7H_2O$	Granular	(1)	(1)	8,5 a 11
Aluminato de sódio	$Na_2Al_2O_4$	Floco	11 a 12	10 a 30	5,5 a 7,0

FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003), DEGANI (1981) e AZEVEDO NETTO *et al.*, (1979)
(1) Não informado

Quando a água ou efluente apresentarem um Potencial Zeta muito negativo, ou não possuírem partículas que sirvam como núcleos de flocos (baixa turbidez) torna-se necessário o uso de auxiliares de coagulação. Estes produtos têm a finalidade ajudar e acelerar o processo de formação de flocos volumosos e de rápida sedimentação. Substâncias como sílica ativa, carbonato de cálcio, bentonita, gás

carbônico, polímeros e flocos pré-formados (retorno de lodo fresco) são usados com este objetivo. Os polímeros terão atenção especial na seção 2.3.5.2.

Em termos práticos, o que realmente interessa no processo de coagulação e floculação são a dosagem e a condição ótima para aplicação do coagulante, etapa de grande importância no tratamento, uma vez que as etapas subsequentes dependem desta. Isso porque as reações envolvidas são muito rápidas e dependem da energia de agitação, da dose do coagulante, do pH e da alcalinidade da água. Caso estas condições estejam corretas, as reações ocorrem em um espaço de tempo bastante reduzido (MIERZWA, 2005).

2.3.5.2. Polímeros

Os polímeros, neste caso, utilizados como auxiliares de coagulação, são os polieletrólitos. Estes podem ser divididos em duas categorias: naturais e sintéticos. Importantes polieletrólitos naturais incluem polímeros de origem biológica e aqueles derivados de amido tais como derivados da celulose e alginatos. Os polieletrólitos sintéticos são polímeros de cadeia longa e alto peso molecular (METCALF & EDDY, 2003) que, quando lançados em água, podem apresentar um número de cargas muito grande, distribuído ao longo da cadeia (AZEVEDO NETTO, *et al.*, 1979).

Os polieletrólitos também podem ser classificados pela sua carga. Quando positiva o polieletrólito é chamado de catiônico. Quando negativa, aniônico e quando não possui carga, não iônico (METCALF & EDDY, 2003; KIEKY, 1996; ECKENFELDER, 1989; AZEVEDO NETTO, *et al.*, 1979).

A ação dos polieletrólitos pode ser dividida em três categorias gerais (METCALF & EDDY, 2003):

- Neutralização de cargas (uso do polieletrólito catiônico);
- Formação de ponte de polímero (uso dos polieletrólitos aniônico e não iônico);
- Neutralização de cargas e formação de ponte de polímero (uso de polieletrólito catiônico com altíssimo peso molecular).

Os polieletrólitos catiônicos podem ser usados sem a aplicação do coagulante primário (para os tipos de água mais comuns) o que não poderá ser feito quando se tratar de aniônicos e não iônicos. Os catiônicos podem baixar o Potencial Zeta a valores bastante reduzidos e ainda promover a floculação (AZEVEDO NETTO, *et al.*,

1979). Segundo METCALF & EDDY (2003), para se ter neutralização adequada das cargas negativas, o polieletrólito catiônico deve ser adsorvido pela partícula, o que acontecerá somente se a intensidade da mistura for suficiente para que os polímeros sejam adsorvidos pelas partículas coloidais.

Os polieletrólitos aniônicos e não iônicos, apresentam grande poder de floculação, mas não gozam das características favoráveis de carga dos catiônicos (AZEVEDO NETTO, *et al.*, 1979). Estes polieletrólitos, segundo Metcalf & Eddy (2003), são bons floculadores, pois são capazes de formar pontes de polímeros. A ponte ocorre através da adsorção do polieletrólito na partícula por mistura rápida. A partícula já com a ponte de polímero se emaranha com outras partículas durante o processo de floculação até atingir tamanho e peso suficientes para remoção por sedimentação. Quando utilizados polieletrólitos catiônicos de elevado peso molecular também é possível promover a formação de pontes de polímeros pela redução das cargas superficiais da partícula (METCALF & EDDY, 2003).

No Quadro 2.61 é possível visualizar um processo inicial de escolha de um coagulante e um auxiliar de coagulação baseado em água bruta com níveis variados de turbidez e alcalinidade. Água que possui alta turbidez com alta alcalinidade possui fácil tratamento, possuindo facilidade na formação do floco. Água com alta turbidez e baixa alcalinidade, pode ter sua alcalinidade aumentada adicionando cal e assim otimizando a coagulação. Já água com baixa turbidez e alcalinidade é de difícil tratamento, necessitando de correção da alcalinidade com cal e altas doses de polieletrólitos com alto peso molecular (KIELY, 1996).

O uso de polieletrólitos, mesmo que em pequenas dosagens, traz grandes vantagens técnicas, tais como: (1) a redução significativa do consumo de coagulantes, (2) a melhoria na decantação e filtração, (3) redução no volume do lodo nos decantadores, (4) redução no tempo da decantação, (5) a não interferência no pH, reduzindo ou mesmo eliminando a necessidade de compostos alcalinos e (6) a não contribuição no aumento de sólidos totais dissolvidos, como ocorre com coagulantes tradicionais (AZEVEDO NETTO, *et al.*, 1979).

A escolha do tipo e da dosagem dos polieletrólitos, via de regra, é feita por tentativa, apoiado por ensaios de laboratório. As dosagens típicas situam-se na faixa de 0,10 a 0,25 mg/L, em solução de 0,2 a 2,0% (MANCUSO e SANTOS, 2003).

Segundo KIELY (1996) a dose de polieletrólito pode variar ainda mais, ficando numa faixa entre 0,05 e 0,5 mg/L. Como os polieletrólitos são muito caros, a dose ótima a ser aplicada em conjunto com o coagulante deve ser determinada através do uso do teste de jarros (*Jar test*).

QUADRO 2.61 – COAGULANTES E POLIELETRÓLITOS USADOS PARA O TRATAMENTO DE TURBIDEZ

Classe da água	Descrição da água	Sulfato de alumínio	Cloreto Férrico	Polieletrólito
A	Alta turbidez > 5 NTU Alta alcalinidade > 250 mg/L HCO ₃ (Fácil de tratar)	Eficaz se o pH estiver entre 5 e 7	Eficaz se o pH estiver entre 5 e 7	Não necessário
B	Alta turbidez Baixa alcalinidade < 50 mg/L HCO ₃	Eficaz se o pH estiver entre 5 e 7 + Cal	Eficaz se o pH estiver entre 5 e 7 + Cal	Não necessário
C	Baixa turbidez Alta alcalinidade	Auxílio de polieletrólito é essencial	Auxílio de polieletrólito é essencial	Essencial
D	Baixa turbidez < 1 NTU Baixa alcalinidade < 50 mg/L HCO ₃ (Difícil de tratar)	Possível apenas com cal e polieletrólito	Possível apenas com cal e polieletrólito	Essencial

FONTE: KIELY (1996)

2.3.5.3. Mistura e Flocculação

A mistura visa conduzir os constituintes, neste caso os coagulantes e seus auxiliares, em câmaras de mistura rápida, a um estado de uniformidade desejada promovendo uma coagulação homogeneia. Esta mistura intensa é que assegura uma distribuição uniforme do coagulante na água, colocando-o em contato com as partículas existentes em suspensão, antes que a reação esteja terminada (LEME, 1979).

A inexistência dessa mistura intensa e adequada implica em que parte da água seja supertratada, enquanto que outras partes sejam insuficientemente tratadas, prejudicando o tratamento.

No campo de tratamento de efluentes, dois tipos de mistura possuem maior destaque e importância, sendo elas a mistura rápida contínua e a mistura contínua. A mistura rápida contínua em tratamento de efluentes tem a função de misturar uma substância com outra e tem sua principal aplicação em (1) combinar produtos químicos com efluentes (ex.: promover flocculação e desinfecção), (2) combinar líquidos miscíveis e (3) a adição de produtos químicos em lodo e biossólidos para

melhorar suas características de desidratação. A mistura contínua é usada onde o conteúdo de reatores ou tanques de espera deva permanecer em suspensão tais como lagoas de equalização, tanques de floculação, tanques de lodos ativados, lagoas aeradas e digestores aeróbios. Neste capítulo iremos tratar apenas da aplicação em floculação (METCALF & EDDY, 2003).

O fenômeno da floculação é o processo pelo quais as partículas em estado de equilíbrio eletrostaticamente instável no seio da massa líquida são forçadas a se movimentar, a fim de que sejam atraídas entre si formando flocos, que, com a continuidade da agitação, tendem a aderir uns aos outros, tornando-se pesados, para posterior separação nas unidades de decantação e filtração (AZEVEDO NETTO, *et al.*, 1979).

Embora não usado de forma rotineira, a floculação em efluentes por agitação mecânica ou por ar pode ser usada para (METCALF & EDDY, 2003):

- Aumentar a remoção de sólidos suspensos e DBO em decantadores primários;
- Condicionamento de efluentes contendo certos resíduos industriais;
- Aumentar a performance dos decantadores secundários de processos de lodos ativados, e;
- Como um pré-tratamento do efluente a ser filtrado posteriormente.

De forma um pouco mais aprofundada, pode-se dizer que existem dois tipos de floculação: a microfloculação e a macrofloculação. A distinção entre estes dois tipos de floculação está baseada no tamanho das partículas envolvidas. A microfloculação, também conhecida como floculação pericínética, é o termo usado para referir-se a agregação de partículas provocada pelo Movimento Browniano das moléculas. Sua faixa de atuação é significativa para partículas com tamanho entre 0,001 e 1 μm . Na macrofloculação, ou floculação ortocínética, a faixa de atuação é para partículas acima de 1 ou 2 μm . A macrofloculação pode ser provocada por (1) gradiente de velocidade induzido e (2) diferencial de sedimentação (METCALF & EDDY, 2003).

Fazendo mistura com rotor mecânico em reatores ou câmaras de mistura, é possível obter circulação e cisalhamento do fluido. A força atribuída por unidade de

volume pode ser usada como estimativa da efetividade da mistura, baseado no raciocínio de que mais força aplicada cria mais turbulência, e mais turbulência resulta em melhor mistura. CAMP e STEIN (1946, citado por: METCALF & EDDY, 2003) estudaram a fundamentação e o efeito do gradiente de velocidade em vários tipos de tanques de coagulação e desenvolveram a Equação 2.11 para ser usada em projeto e operação de sistemas que utilizam dispositivo por mistura mecânica.

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} \quad (2.11)$$

Onde: G = Gradiente de velocidade média, T^{-1} , 1/s;

P = Potência necessária, W;

μ = Viscosidade dinâmica, N.s/m²;

V = Volume do flocculador, m³.

Valores típicos para G usados em várias operações de mistura são apresentados no Quadro 2.62.

QUADRO 2.62 – VALORES TÍPICOS PARA TEMPO DE DETENÇÃO E GRADIENTE G PARA MISTURA E FLOCULAÇÃO EM EFLUENTES

Processo	Faixa de valores	
	Tempo de detenção	Valor G (s ⁻¹)
Mistura		
Operações típicas de mistura rápida em tratamento de efluentes.	5 – 30 seg	500 – 1500
Mistura rápida para efetivo contato inicial e dispersão de produtos químicos.	< 1 seg	1500 – 6000
Mistura rápida de produtos químicos para processos de filtração por contato.	< 1 seg	2500 – 7500
Floculação		
Processo típico de floculação usado em tratamento de efluentes.	30 – 60 min	50 – 100
Floculação em processos de filtração direta.	2 – 10 min	25 – 150
Floculação em processos de filtração por contato.	2 – 5 min	25 – 250

FONTE: Adaptado de METCALF & EDDY (2003)

2.3.5.4. Sedimentação

A sedimentação ou decantação é um processo dinâmico de separação de partículas sólidas suspensas nas águas e efluentes. Estas partículas, sendo mais pesadas que o líquido, tenderão a cair para o fundo do decantador com certa velocidade (AZEVEDO NETTO, *et al.*, 1979).

Os objetivos e aplicações da sedimentação é a retirada de partículas finas como areia, SST, e flocos formados por coagulação química de materiais e organismos de difícil sedimentação. A sedimentação também é usada para criar um lodo mais concentrado de sólidos com possibilidade de ser manuseado e tratado mais facilmente (AZEVEDO NETTO, *et al.*, 1979; METCALF & EDDY, 2003).

Segundo as características das partículas a serem removidas, o processo de sedimentação pode ser classificado em quatro tipos (GREGORY E ZABEL, 1990; METCALF & EDDY, 2003):

- Tipo 1: sedimentação de partículas discretas, pouco concentradas na água, em que a floculação e a ação entre as partículas são desprezíveis;
- Tipo 2: sedimentação de partículas em baixa concentração ou floculenta, na qual as partículas continuam a se agregar à medida que o processo de sedimentação ocorre, fazendo com que a velocidade de sedimentação também aumente;
- Tipo 3: sedimentação obstruída ou por zona, na qual a concentração de partículas é grande, o que favorece os efeitos de interação e a formação de uma interface bem definida entre o líquido clarificado e os sólidos que sedimentam;
- Tipo 4: sedimentação por compressão, na qual a concentração de partículas é grande, ocorrendo a sedimentação por camadas.

Do ponto de vista do tratamento de água para o abastecimento industrial, o tipo de sedimentação que prevalece é o tipo 2, pois a concentração de partículas que interagem à medida que sedimentam é baixa. Os sólidos formados no processo de floculação quando a água é mantida por um período de tempo suficientemente adequado (tempo de detenção hidráulico) em um dispositivo denominado sedimentador ou decantador (MIERZWA, 2005).

A velocidade de sedimentação de partículas relativamente grandes (diâmetro acima de 10 mm) precipitam-se com um movimento acelerado, e podem ser calculada através da lei de Newton (queda dos corpos). As partículas relativamente pequenas (diâmetro inferior a 0,1 mm), no seu movimento de deposição, atingem um regime de equilíbrio e apresentam velocidade constante, sendo seu movimento calculado através das leis de Allen e Stokes (MACEDO FILHO e BRANCO, 1964).

As partículas extremamente pequenas, da ordem de milésimos de milímetros ou menores, são objetos do movimento browniano contínuo, não sendo sedimentáveis. No caso de remoção de material coloidal, recorre-se à precipitação química ou coagulação (AZEVEDO NETTO, *et al.*, 1979). O Quadro 2.63 apresenta algumas características de forma e sedimentação das partículas mais comumente encontradas no tratamento de água e efluentes.

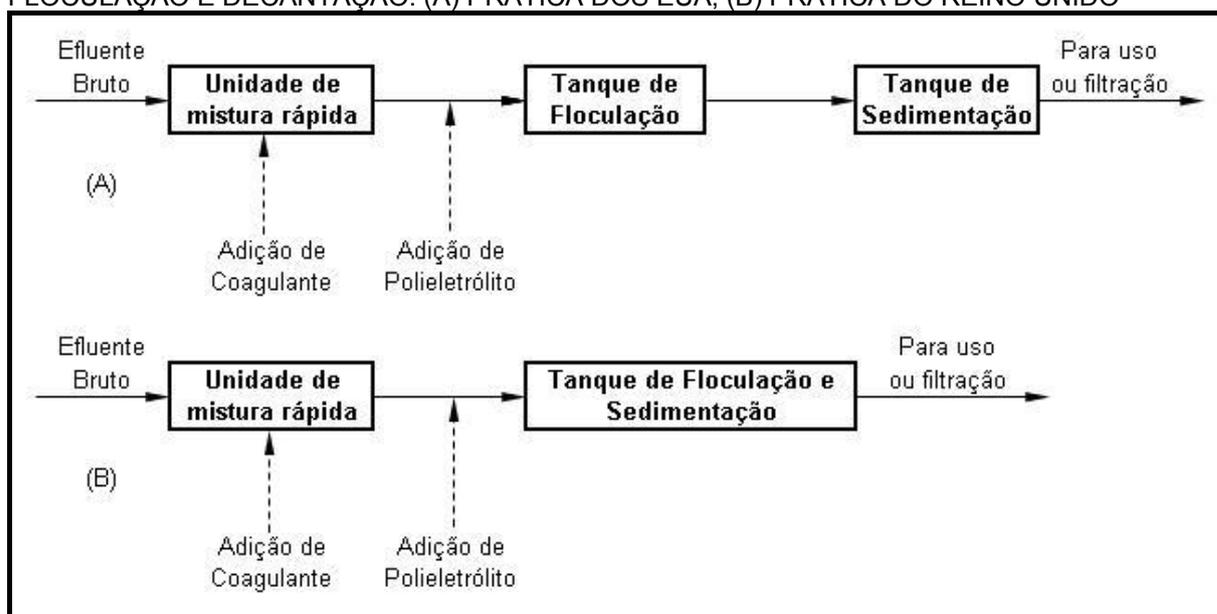
QUADRO 2.63 – CARACTERÍSTICAS DE SEDIMENTAÇÃO DE ALGUMAS PARTÍCULAS

Tipo de partícula	Dimensão (mm)	Área superficial (m ²)	Tempo de sedimentação para o percurso de 1 metro
Areia Fina	0,20	-	40 segundos
Areia	0,10	-	2 minutos
Silte	0,01	0,314	108 minutos
Bactérias	0,001	3,14	180 horas
Material Coloidal	0,0001	31,4	755 dias

FONTE: Adaptado de NALCO (1988) e AZEVEDO NETTO, *et al.*, (1979)

Com relação à sedimentação de partículas flocculentas (tipo 2), existem duas principais metodologias usadas (Figura 2.8). A primeira é tradicionalmente utilizada nos Estados Unidos onde a prática é ter tanques de floculação e sedimentação separados, enquanto que no Reino Unido a prática tem sido promover a floculação e sedimentação no mesmo tanque (KIELY, 1996).

FIGURA 2.8 – ESQUEMA PARA TRATAMENTO DE ÁGUA E EFLUENTES POR COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E DECANTAÇÃO: (A) PRÁTICA DOS EUA, (B) PRÁTICA DO REINO UNIDO



FONTE: Adaptado de KIELY (1996)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é feita a descrição dos materiais utilizados na pesquisa e os métodos aplicados para se alcançar os objetivos especificados viabilizando a análise e discussão no Capítulo 4.

3.1. MATERIAIS

3.1.1. A indústria de assentos automotivos

Em função da importância do setor metal-mecânico, esta pesquisa adotou como estudo de caso uma indústria que é parte integrante de um grupo francês fundado em 1997 da fusão de duas companhias fabricantes de sistemas automotivos, sendo os sistemas de escapamentos e módulos de *front-end* e bancos para automóveis. Atualmente possui mais de 50 mil colaboradores e está presente em mais de 27 países.

A unidade industrial em estudo visa ser reconhecida como líder em participação do mercado automobilístico sul-americano e para tanto possui uma política da qualidade que procura proporcionar valor para o cliente, o colaborador e o acionista através da:

- Satisfação de clientes e atendimentos de seus requisitos;
- Aplicação do sistema de excelência da empresa;
- Melhoria contínua dos produtos e processos, e;
- Preservação do meio ambiente e respeito à comunidade na qual atua.

A missão da empresa é oferecer excelência em soluções automotivas, agregando valor para o cliente, colaborador, acionista e sociedade.

De acordo com informações fornecidas (CESAR WAITUCH, contato pessoal, 2006), a indústria atua em diferentes áreas, podendo fornecer desde componentes, serviços de pintura, estruturas metálicas e até os bancos completos para as montadoras nacionais ou fornecedores, sendo eles:

- Componentes: Cliente Lear do Brasil;
- Pintura: Cliente Keiper;

- Estruturas metálicas: Clientes GM e Audi-VW;
- Bancos estofados: Clientes Peugeot e Renault.

3.1.1.1. O processo de fabricação

O processo de fabricação dos assentos, também segundo WAITUCH, se da conforme a seguinte metodologia:

- a) Inspeção de recebimento: nesta etapa é necessária para assegurar que os componentes comprados estejam de acordo com os requisitos exigidos em projeto, desenho ou planos de controle visando garantir a qualidade dos componentes e processos internos;
- b) Manufatura: aqui ocorre a fabricação de componentes e estruturas para os bancos de automóveis, seguindo os procedimentos internos de qualidade, segurança do colaborador, melhoria contínua e atendimento aos requisitos do projeto e do cliente, utilizando-se dos seguintes processos:
 - Conformação mecânica: que consiste na dobra de arames utilizados nas estruturas dos bancos por máquina automatizada;
 - Rebitagem orbital: é a união de componentes para fabricação de subgrupos a serem utilizados internamente pelo processo de rebitagem orbital, especificamente para partes móveis ou pontos de articulação das estruturas dos bancos;
 - Solda à resistência: visa unir os componentes em máquinas automatizadas de solda à resistência ou pinças manuais (trafogun) para fabricação de subgrupos a serem utilizados internamente em outros processos (peças pequenas, elementos de fixação) ou estruturas de bancos completos.
 - Solda arco MIG/MAG: Utilizada na fabricação de alguns subgrupos para serem usados internamente, mas na grande maioria, empregada

para a solda final (fechamento) das estruturas dos bancos antes da pintura. Nas operações de solda em que não existem requisitos de segurança ou regulamentação, utiliza-se a solda manual, operada pelo homem. Nas soldas em que são exigidos requisitos de segurança, aplica-se solda robotizada, a fim de garantir a repetibilidade do processo, tanto em posicionamento, como em quantidade de soldas por peça:

- Pintura: esta etapa é descrita no item 3.1.1.2;
- Montagem das estruturas: Após pintadas, as estruturas passam pelo processo de montagem, onde são agregadas às estruturas componentes que antecederão o estofamento (peças plásticas, telas para suportes de espuma, entre outras), e também os trilhos inferiores que serão fixados à carroceria dos veículos para permitir a regulagem longitudinal dos bancos, assim como alavancas de acionamento dos trilhos e da articulação do encosto;

c) Qualificação final: nesta etapa, 100% das peças são verificadas em suas características essenciais de funcionamento estabelecidas pelo cliente.

Depois de aprovadas, as peças seguem para a expedição onde são embarcadas diariamente e em horários estabelecidos nas quantidades solicitadas por cada cliente, no sistema *Just in Time*. O estoque interno é o mínimo necessário para absorver as variações de demanda do cliente e administrado por FIFO – *First In First Out*.

A etapa de estofamento (aplicável apenas aos clientes Peugeot-Citroën e Renault) é feita em unidades dentro do parque industrial do cliente. Neste processo, são agregados às estruturas metálicas já montadas e os componentes de estofamento (espumas, capas, peças plásticas, *air-bags*, apoios de cabeça, entre outros). Os bancos estofados são entregues dentro das fábricas de automóveis, dentro da linha de montagem, nas quantidades e modelos solicitados pelo cliente.

3.1.1.2. O processo de pintura e os efluentes gerados

Para promover a pintura das estruturas em metal que sustentam os assentos, conforme informações fornecidas (EZEQUIEL SERAFIM, contato pessoal, 2006), a empresa utiliza o processo de pintura cataforética.

Este processo engloba basicamente três etapas: (1) o tratamento de superfície da peça; (2) a pintura, e; (3) a secagem da tinta. Inicialmente as peças são recebidas em pequenos lotes onde são penduradas em ganchetas dispostas em trilhos. Estes trilhos seguem até o TTS – túnel de tratamento de superfície, onde as peças recebem inicialmente um banho por aspensão de uma solução desengraxante a 62°C com o objetivo de retirar partículas e sujidades nela aderidas. Em seguida as peças passam por três estágios de enxágüe. Estes enxágües são operados à temperatura ambiente. A seguir as peças passam pela etapa de pré-tratamento superficial através da tecnologia de nanocerâmica, que substitui a fosfatização. A função desta etapa é proteger a estrutura do assento contra a oxidação. Finalizando esta etapa, as peças seguem para o enxágüe com água deionizada para que seja interrompida a ação da nanoconversão e receber a lavagem final antes da pintura.

Após terminado o tratamento superficial as peças seguem para o tanque de imersão onde recebem a pintura através do método E-coat ou eletrodeposição. Este processo também apresenta outras denominações como Elpo, eletroforese, KTL e Cataforese (IDEAL S.A., 1990). O processo consiste na imersão das peças no banho E-coat (tinta diluída em água) através do qual se faz passar uma corrente elétrica contínua, ocorrendo, através da diferença de potencial (ddp) aplicado, a deposição do revestimento. A aplicação da tinta por eletrodeposição está baseada no princípio da eletroforese que é a migração das partículas de tinta carregadas eletricamente por um potencial elétrico (IDEAL S.A., 1990). O resultado é uma pintura coesa e firme.

Terminado este estágio, as peças seguem para os tanques de UF1 com água de processo ultrafiltrada classe 1, UF2 com água de processo ultrafiltrada classe 2 e UFP com água ultrafiltrada pura que são etapas de enxágüe para retirada do excesso de pigmento. De acordo com informações fornecidas (ALEXSSANDRA ANGELINO, contato pessoal, 2006), a indústria utiliza cerca de 35 m³/dia de água

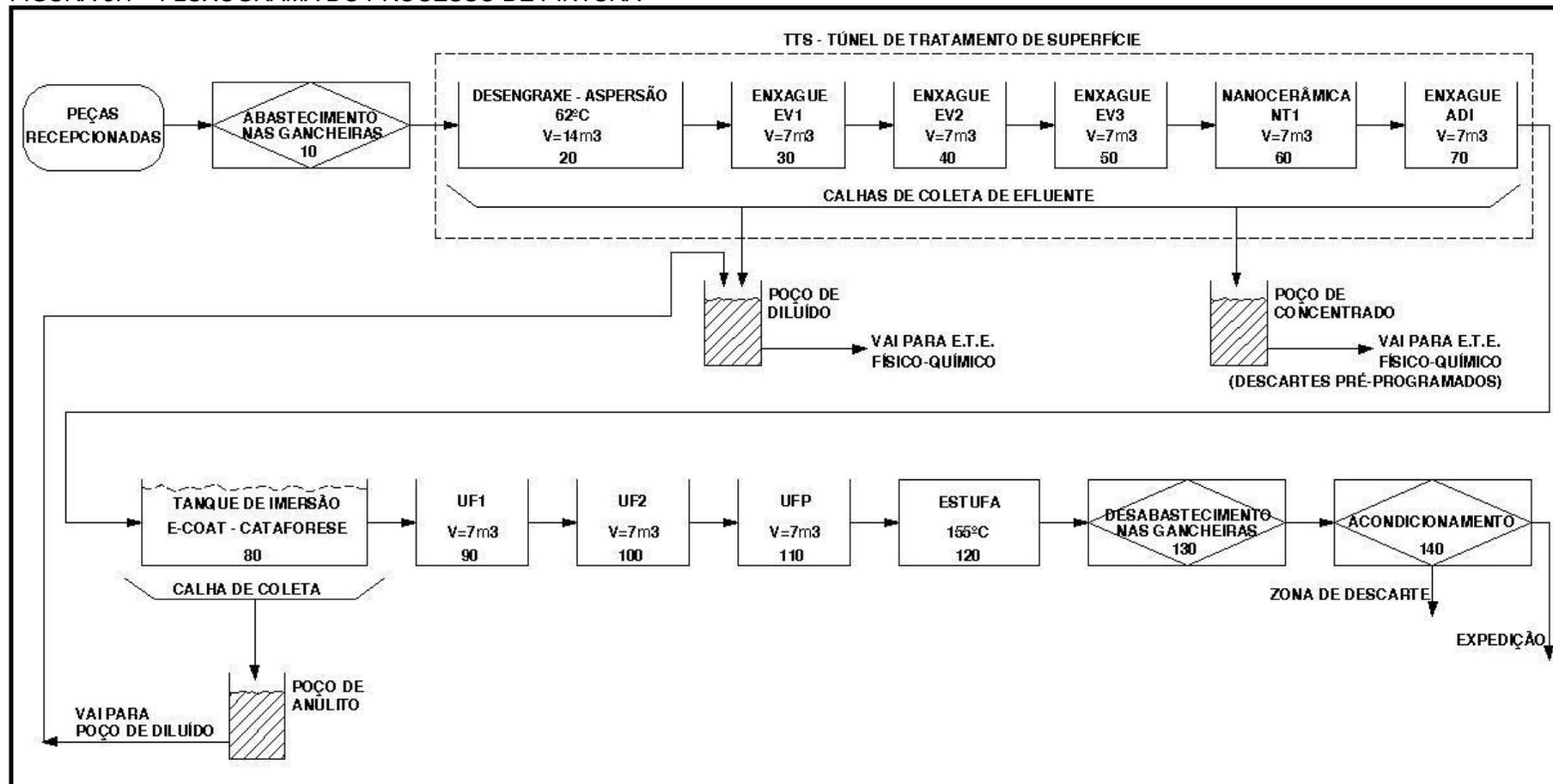
para o processo de desengraxe e pintura, sendo aproximadamente de 50% da vazão para o tratamento de superfície e os outros 50% para a pintura.

Na terceira e última etapa, as peças seguem para a estufa de secagem onde ficam por 45 minutos a uma temperatura de 155°C. Terminada a secagem, as peças são retiradas das ganchetas e seguem para verificação da qualidade, podendo ser descartadas ou seguirem para embalagem e expedição.

A geração de efluentes na linha de pintura se dá basicamente de duas formas: (1) do excedente dos enxágües e banhos que caem em calhas de coleta e (2) de descartes programados na linha. Sob o TTS existem calhas que direcionam as soluções desengraxantes para dois poços, um de efluente concentrado e outro de efluente diluído. Também sob o tanque de imersão existe uma calha que direciona o efluente para um poço chamado “poço de anulito”. Este efluente do poço de anulito é direcionado para o poço de efluente diluído e estes conduzidos para a estação de tratamento físico-químico. O efluente do poço de concentrado recebe um tratamento diferenciado antes de ser enviado à ETE. Primeiramente deixa-se encher o tanque e depois faz-se a separação do óleo. Após esta etapa o efluente é enviado em quantidades pré-programadas para a ETE afim de não prejudicar em demasia o tratamento. O esvaziamento do tanque leva em torno de dois meses, sendo então iniciada outra batelada.

A Figura 3.1 apresenta o fluxograma básico do processo de pintura e sua geração de efluentes.

FIGURA 3.1 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PINTURA



FONTE: Adaptado de FAURECIA (2006)

Legenda: ADI: Água deionizada; UF1: Água ultrafiltrada banho 1; UF2: Água ultrafiltrada banho 2; UFP: Água ultrafiltrada pura

3.1.1.3. O Tratamento do efluente

O efluente de indústrias que atuam no setor de tratamento de superfície e pintura possui características como alta DQO, baixa biodegradabilidade, elevado teor de óleos e graxas (muitas vezes emulsionados) e pigmentos (PAWLOWSKY, 2004). No caso da indústria deste estudo de caso, não é diferente.

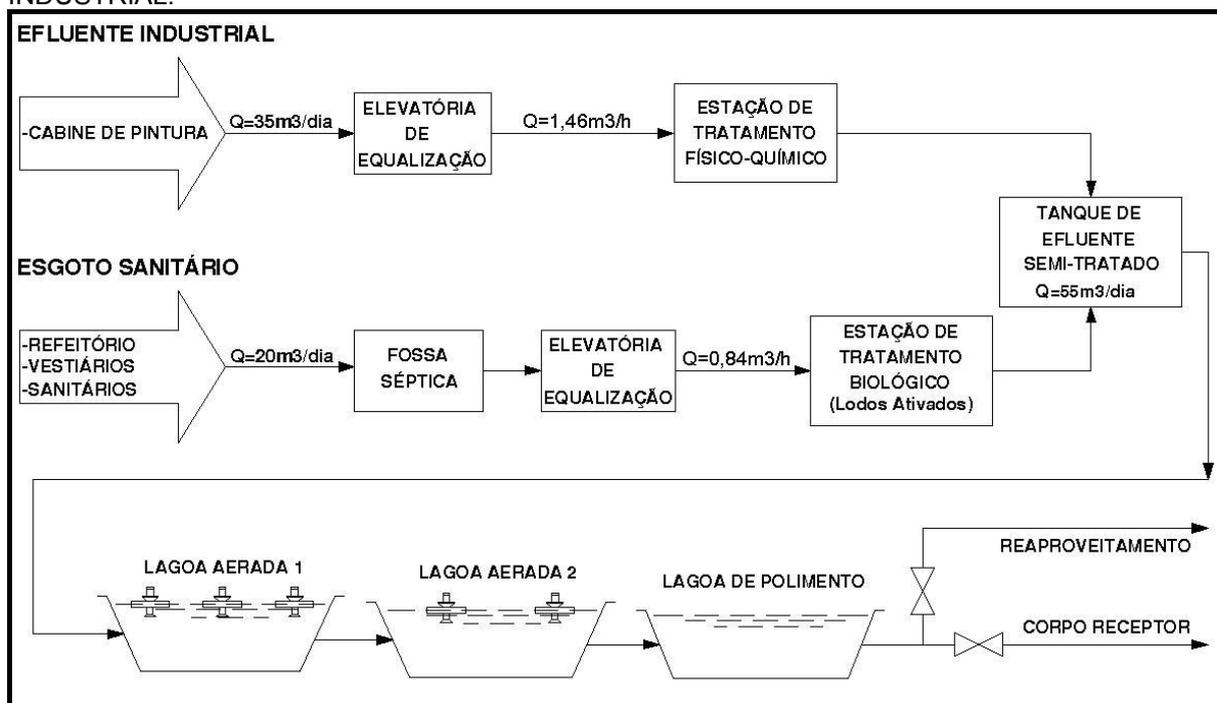
Para proporcionar a tratabilidade do efluente, existe um sistema de tratamento de efluentes que está dividido em três partes: (1) o tratamento biológico do esgoto sanitário compreendido pelas contribuições do refeitório, vestiários e sanitários com vazão de 20 m³/dia; (2) o tratamento físico-químico do efluente industrial proveniente da linha de pintura com vazão de 35 m³/dia, e (3) o tratamento biológico por lagoas que recebe a contribuição das duas primeiras etapas. As características de cada tratamento são apresentadas a seguir:

- Tratamento biológico do esgoto sanitário composto por:
 - Fossa séptica;
 - Elevatória de equalização;
 - Decantador primário;
 - Tanque de aeração;
 - Decantador secundário, e;
 - Câmara de contato para dosagem de cloro (desativada).
- Tratamento físico-químico do efluente industrial composto por:
 - Elevatória de equalização;
 - Tanque de armazenamento de efluente diluído;
 - Tanque de armazenamento de efluente concentrado;
 - Tanque de coagulação com uso de cloreto férrico;
 - Tanque de neutralização com o uso de cal;
 - Tanque de refloculação com o uso de polímeros;
 - Decantador lamelar;
 - Tanque pulmão, e;
 - Filtro prensa.

- Tratamento biológico por lagoas composto por:
 - Tanque de efluente semi-tratado;
 - Calha Parshall;
 - Lagoa aerada 1 (com três aeradores);
 - Lagoa aerada 2 (com dois aeradores);
 - Lagoa de polimento;
 - Calha Parshall.

Após ter passado pelas etapas de tratamento citadas, o despejo líquido da indústria encontra-se dentro das condições exigidas pelo Instituto Ambiental do Paraná - IAP e Resolução nº. 357, artigo 34 do CONAMA (2005) e, portanto é lançado no corpo hídrico local. A Figura 3.2 apresenta um fluxograma com as etapas do sistema de tratamento de efluentes da unidade industrial em questão.

FIGURA 3.2 – FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIO E INDUSTRIAL.



3.1.1.4. Potenciais áreas de reúso do efluente na planta industrial

No caso da unidade industrial deste estudo de caso, a planta possui duas torres de água, situação que facilita a separação entre a água recuperada da água potável. Segundo SERAFIM, a primeira torre abastece os setores da cozinha,

refeitório industrial e torneiras dos banheiros. A segunda torre os demais pontos de consumo fabril. Atualmente estas torres estão sendo alimentadas com água de um poço artesiano que possui capacidade para produção de 15 m³/h. A produção atual deste poço está em 10 m³/h e a água precisa passar por um abrandador com resina trocadora de íons para atingir a qualidade necessária para o uso.

A obtenção do potencial de reúso de efluentes deve considerar, inicialmente, as atividades nas quais pode-se utilizar o efluente disponível, a demanda de água exigida e os requisitos de qualidade para a água.

Para o caso da indústria estudada, as atividades com potencial para aplicação da prática de reúso de efluentes, podem-se considerar as seguintes:

- Processo de pintura;
- Reposição de perdas em torres de resfriamento;
- Lavagem de pisos;
- Irrigação de áreas verdes industriais, e;
- Descarga sanitária.

O consumo diário de água para cada aplicação é obtido por meio das informações referentes à frequência de uso e ao valor da grandeza pela qual o consumo de água é expresso conforme apresentado no Quadro 3.1.

QUADRO 3.1 – DEMANDA DE ÁGUA DE REÚSO POR APLICAÇÃO

Aplicação	Demanda Específica	Unidades	Frequência de Uso	Demanda Diária (m ³)
Água de processo (Pintura)	x	x	x	35,0 ⁽¹⁾
Torres de resfriamento	x	x	x	0,2 ⁽¹⁾
Lavagem de pisos	1,4 L/m ² ⁽²⁾	18.213 m ² ⁽³⁾	Diária ⁽³⁾	25,5
Irrigação de áreas verdes industriais	2 L/m ² .dia ⁽⁴⁾	1.700 m ² ⁽⁵⁾	Diária ⁽⁴⁾	3,4
Descarga Sanitária	6 L/descarga ⁽⁴⁾	676 funcionários ⁽¹⁾	3 vezes / dia.funcionário ⁽⁴⁾	12,2
TOTAL				76,3

⁽¹⁾ FONTE: Ezequiel SERAFIM, contato pessoal, (2006)

⁽²⁾ FONTE: ISS Servisystem do Brasil Ltda, contato pessoal (2006)

⁽³⁾ FONTE: Alexssandra ANGELINO, contato pessoal, (2006)

⁽⁴⁾ FONTE: TOMAZ (2000)

⁽⁵⁾ Valor equivalente a uma faixa de 3 metros de grama em volta do prédio industrial

3.1.1.5. Critérios adotados para o reúso de água na indústria de assentos

Os critérios adotados para obtenção dos requisitos mínimos dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água recuperada para cada local de consumo, foram levantados através da bibliografia pesquisada, de informações provenientes da indústria estudada e considerações do autor. Para os requisitos obtidos da bibliografia, foi dada prioridade aos sugeridos pela US EPA à países que não possuem tais diretrizes. Estes requisitos são apresentados no Quadro 3.2.

QUADRO 3.2 – REQUISITOS FÍSICO-QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS MÍNIMOS NECESSÁRIOS PARA REUTILIZAÇÃO DE ÁGUA RECUPERADA

Parâmetros	Unidade	Potenciais locais de consumo de água recuperada			
		Água de Processo (Pintura)	Torres de resfriamento	Lavagem de pisos e irrigação de áreas verdes industriais	Descarga sanitária
Temperatura	°C	Ambiente	Ambiente	Ambiente	Ambiente
pH	~	6 - 8 ⁽¹⁾	6 - 9 ⁽²⁾	6 - 9 ⁽²⁾	6 - 9 ⁽²⁾
Turbidez	NTU	≤ 2 ⁽⁸⁾	≤ 3 ⁽⁴⁾	≤ 2 ⁽²⁾	≤ 2 ⁽²⁾
Cor	Hazen	≤ 20 ⁽⁷⁾	SE	≤ 15 ⁽⁶⁾	≤ 15 ⁽⁶⁾
DQO	mg/L	≤ 50 ⁽⁹⁾	≤ 75 ⁽⁵⁾	≤ 25 ⁽¹⁰⁾	≤ 25 ⁽¹⁰⁾
DBO ₅	mg/L	≤ 30 ⁽⁸⁾	≤ 30 ⁽²⁾	≤ 10 ⁽²⁾	≤ 10 ⁽²⁾
CT	mg/L	SE	SE	SE	SE
COT	mg/L	SE	SE	SE	SE
Cl	mg/L	SE	SE	SE	SE
ST	mg/L	≤ 1005	≤ 530	SE	SE
SST	mg/L	≤ 5 ⁽⁷⁾	≤ 30 ⁽²⁾	SE	SE
SDT	mg/L	≤ 1000 ⁽⁷⁾	≤ 500 ⁽⁵⁾	≤ 1000 ⁽⁶⁾	≤ 1000 ⁽⁶⁾
Coliformes Totais	NMP/100mL	≤ 2,2 ⁽⁸⁾	SE	SE	SE
Coliformes Fecais	NMP/100mL	Ausente ⁽⁹⁾	≤ 200 ⁽²⁾	Ausente ⁽²⁾	Ausente ⁽²⁾
Condutividade	μ.S/cm	SE	800 - 1200 ⁽³⁾	SE	SE
Dureza	CaCO ₃	≤ 30 ⁽¹⁾	50 - 180 ⁽³⁾	≤ 500 ⁽⁶⁾	≤ 500 ⁽⁶⁾

⁽¹⁾ FONTE: Alexssandra ANGELINO, contato pessoal, (2006)

⁽²⁾ FONTE: US EPA (2004)

⁽³⁾ FONTE: US EPA (2004), valores para a cidade de San Francisco

⁽⁴⁾ FONTE: US EPA (2004), valores para o estado do Texas

⁽⁵⁾ FONTE: METCALF & EDDY (2003)

⁽⁶⁾ FONTE: Valor máximo recomendado para água portátil, de acordo com a Portaria do Ministério da Saúde nº 518 de 25/03/2004

⁽⁷⁾ FONTE: US EPA (2004), utilizado valores para água de processo em indústrias químicas

⁽⁸⁾ FONTE: US EPA (2004), valores para o estado de Washington

⁽⁹⁾ FONTE: Ezequiel SERAFIM, contato pessoal, (2006)

⁽¹⁰⁾ FONTE: Considerando o valor da DQO 2,5 vezes maior que a DBO

SE - Sem Especificação encontrada

No caso dos parâmetros de DQO e DBO para a água de processo (pintura), os valores de 50 mg/L e 30 mg/L respectivamente, são para a água recuperada usada no desengraxe das peças. Para o uso desta água recuperada no tanque de

E-coat, tanque de nanocerâmica e no enxague ADI estes parâmetros deverão ser inferiores, na faixa de 15 mg/L para DQO e 10 mg/L para DBO (AILTON BARBOZA DE SOUZA, contato pessoal, 2006) devido à água de alimentação passar por resinas catiônicas e aniônicas. Neste caso, as opções seriam (1) utilizar a água com os padrões para desengraxe e trocar as resinas com maior frequência ou (2) diluir a água recuperada com outra de melhor qualidade até esta atingir os limites citados.

3.1.2. Água residuária

Foi utilizado o efluente final da estação de tratamento de efluentes de indústria metal-mecânica. Este efluente é submetido à pré-tratamento físico-químico, depois misturado com esgoto sanitário dos banheiros e da cozinha industrial e, por fim, tratado biologicamente por duas lagoas aeradas em série e uma lagoa de polimento. O efluente coletado foi da saída da lagoa de polimento. As amostras foram encaminhadas para o Laboratório Prof. Francisco Borsari Netto – LABEAM do Departamento de Hidráulica e Saneamento, Bloco V, da Universidade Federal do Paraná – UFPR, para análise de pH, turbidez, condutividade, DQO, DBO₅, carbono total (CT), carbono orgânico total (COT), carbono inorgânico (CI), sólidos totais (ST), sólidos suspensos totais (SST) e sólidos dissolvidos totais (SDT). As análises de cor e coliformes totais e fecais foram realizadas no laboratório do CEPPA – Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos, também da UFPR.

O Quadro 3.3 apresenta os valores obtidos nas análises realizadas no efluente tratado e tratado com filtração para cada uma das coletas feitas na indústria as quais foram utilizadas para os ensaios de bancada.

Para a filtração do efluente foi utilizado papel filtro quantitativo com as seguintes características:

- Marca: Framex;
- Dimensões: Ø 12,5 ± 0,10 cm;
- 389² - Faixa branca - 6,0 µm;
- Cinza: ≤ 0,0009g.

QUADRO 3.3 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DO EFLUENTE

Parâmetros	Unid.	1ª Remessa		2ª Remessa		3ª Remessa		4ª Remessa		5ª Remessa		6ª Remessa	
		Tratado	Tratado Filtrado										
Temperatura	°C	25,80	25,80	22,00	22,00	22,50	22,50	15,00	15,00	19,00	19,00	21,50	21,50
pH	-	10,60	10,18	9,01	8,71	9,35	9,49	8,73	8,91	8,81	8,94	8,14	8,15
Turbidez	NTU	7,36	0,32	12,60	4,21	12,49	2,74	12,84	0,91	9,12	0,88	7,02	3,03
Cor	Hazen	400	120	345	102	400	125	300	30	300	40	300	40
DQO	mg/L	105,88	62,91	102,00	60,60	163,29	77,53	121,16	35,71	140,20	56,90	162,08	142,02
DBO ₅	mg/L	62,00	35,98	59,02	34,25	70,22	29,06	27,18	4,15	36,45	7,27	48,39	28,08
CT	mg/L	32,08	15,96	83,43	59,93	86,60	47,14	103,10	65,19	106,61	69,94	122,86	117,00
COT	mg/L	27,86	11,72	41,15	20,35	58,46	20,70	49,17	13,63	49,51	14,50	42,39	40,28
Cl	mg/L	4,22	4,24	42,28	39,59	28,14	26,46	53,93	51,55	57,10	55,44	80,47	76,72
ST	mg/L	1.833	1.710	1.380	1.369	1.484	1.468	1.810	1.698	1.552	1.465	1.642	1.588
SST	mg/L	63	5	21	13	55	8	88	9	27	7	39	12
SDT	mg/L	1.770	1.705	1.359	1.356	1.429	1.460	1.722	1.689	1.525	1.458	1.603	1.576
Coliformes Totais	NMP/100ml	< 1	N.A.	1.700	N.A.	4.900	N.A.	730.000	N.A.	3.400	N.A.	3100	N.A.
Coliformes Fecais	NMP/100ml	< 1	N.A.	10	N.A.	< 1,8	N.A.	10	N.A.	8,4	N.A.	74	N.A.
Condutividade	µ.S/cm	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	1.033	1.038	1.041	1.034	1.045	1.050.

N.A.: Não avaliado.

3.1.3. Unidades experimentais

3.1.3.1. Adsorção em carvão ativado

O carvão ativado granular utilizado na pesquisa foi fornecido pela empresa Indústrias Químicas Carbomafra S.A., situada na CIC, com as seguintes características apresentadas abaixo:

- Nome: Carbono Ativado 119;
- Granulometria (Nominal, ASTM D 2862/70): 12 x 40 mesh;
- N°. de iodo (mg I₂/g C.A., AWWA B 600/78): 914 mg I₂/g;
- pH: 9,7
- Conteúdo de cinzas (ASTM D 2866/83): 7,67%;
- Umidade (ASTM D 2867/70): 6,25%
- Peso específico aparente (ASTM D 2854/70): 0,52 g/m³;
- Dureza (ASTM D 3802/79): 97%;
- Área superficial: não informada.

Para promover os ensaios de mistura do carvão ativado foram utilizados os equipamentos locados no laboratório da mesma empresa fornecedora do carvão.

A Figura 3.3 mostra o aparelho em questão, da marca Laborquímica, modelo não especificado, o qual apresenta as seguintes características:

- Controle de velocidade fixo a 70 rpm;
- Controle de temperatura em cinco estágios;
- Rotor de agitação em aço inox com diâmetro de 5,0 cm e área de 19,6 cm²;
- Seis Becker's de plástico com capacidade para 600 mL cada;
- Sistema de agitação por tração mecânica;

FIGURA 3.3 – APARELHO DE TESTES PARA MISTURA DO CARVÃO ATIVADO



3.1.3.2. Oxidação via ozonização

A forma usada para produção de ozônio foi através do uso de oxigênio, fornecido pela empresa White Martins S.A.

Para os testes de ozonização foi utilizado um ozonizador em escala de bancada marca W. CALDWELL N. J., modelo CL-1, oferecido pela NEOTEX Soluções Ambientais, empresa do Grupo White Martins S.A., a qual possuía as seguintes características:

- Capacidade nominal de produção de ozônio: 35 g/h;
- Concentração de massa: 1,0% de O₃;
- Forma de aplicação do ozônio: por difusão em coluna de contato;
- Alimentação de oxigênio:
 - Fluxo de 0,68 Nm³/h;
 - Pressão de 1,0 bar;
- Refrigeração à água;
- Temperatura do refrigerante: ambiente (22°C);
- Volume da batelada: 11,04 litros.

A Figura 3.4 mostra o gerador de ozônio e coluna de contato onde fica armazenado o efluente para tratamento por ozonização e a Figura 3.5 o medidor de ozônio.

FIGURA 3.4 – GERADOR DE OZÔNIO (E) E COLUNA DE CONTATO PARA OZONIZAÇÃO (D)



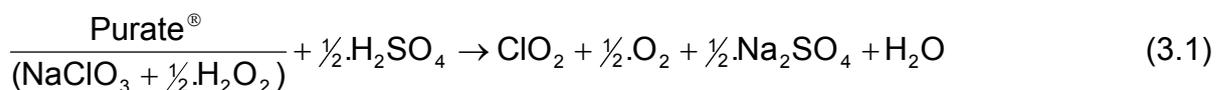
FIGURA 3.5 – MEDIDOR DE OZÔNIO



3.1.3.3. Oxidação via dióxido de cloro

A forma usada para a geração do dióxido de cloro em solução concentrada foi através da tecnologia SVP-Pure[®] + Purate[®], patenteada pela empresa Eka Chemicals do Brasil S.A., onde são utilizados dois produtos químicos, o Purate[®] e o ácido sulfúrico a 78%. O Purate[®] é uma solução de clorato de sódio e peróxido de hidrogênio. O SVP-Pure[®] é o gerador de ClO₂. O clorato de sódio é reduzido pelo

peróxido de hidrogênio e ácido sulfúrico, onde o peróxido de hidrogênio é consumido na reação química. A produção do ClO_2 ocorre de acordo com a Reação 3.1:



Para a geração do dióxido de cloro aplicado nos testes de oxidação foi utilizado um gerador de escala comercial marca SVP-Pure[®], modelo AD, fornecido pela empresa EKA Chemicals, o qual possuía as seguintes características:

- Capacidade nominal de produção de ClO_2 : de 0,5 a 100 kg/h;
- Alimentação de Purate[®] e ácido sulfúrico (78%): via bombas dosadoras diretamente no reator;
- Temperatura de geração: ambiente (25°C);
- Eficiência do sistema: superior a 95%.

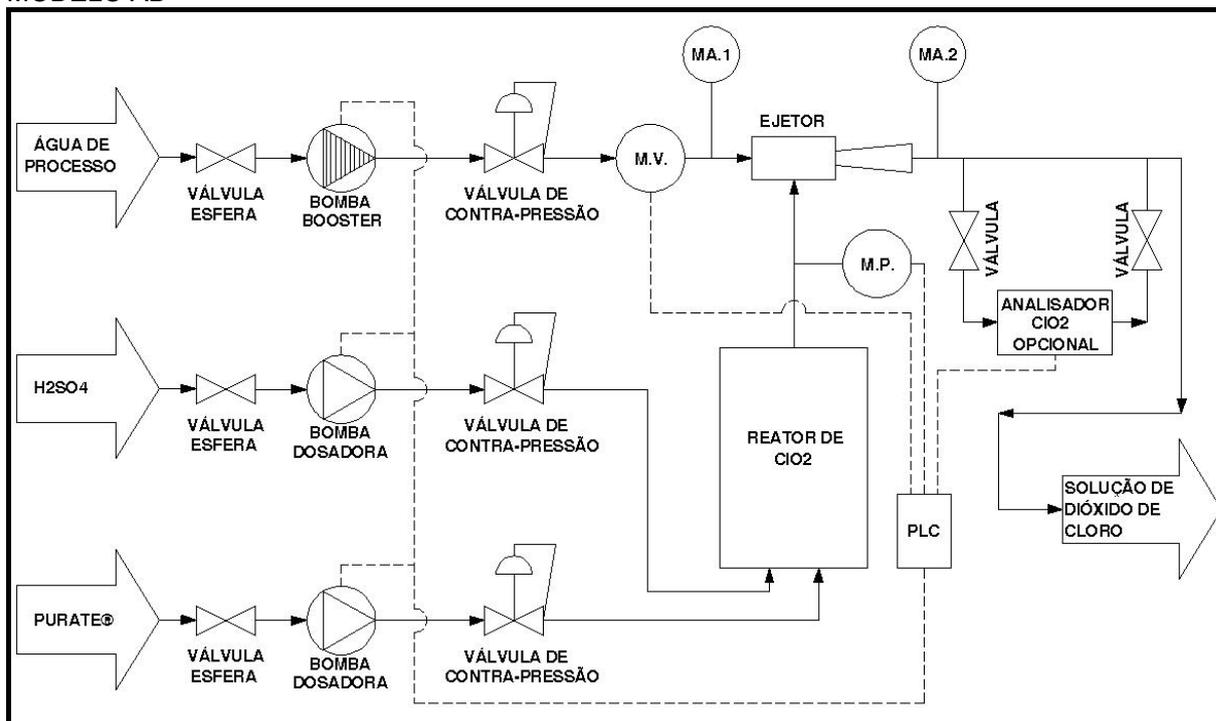
A Figura 3.6 mostra o gerador de dióxido de cloro de onde foi retirada uma amostra de um litro do concentrado de ClO_2 aplicada no efluente. O fluxograma da Figura 3.7 mostra as etapas para obtenção da solução de ClO_2 .

FIGURA 3.6 – UNIDADE GERADORA DE DIÓXIDO DE CLORO SVP-PURE[®] MODELO AD



FONTE: EKA CHEMICALS (2006)

FIGURA 3.7 – FLUXOGRAMA DA UNIDADE GERADORA DE DIÓXIDO DE CLORO – SVP-PURE® MODELO AD



M.V.: Medidor de vazão; M.P.: Medidor de pressão; M.A.1: Manômetro; M.A.2: Manômetro; PLC: Controlador Lógico Programável

Para a aplicação do dióxido de cloro no efluente foi utilizada uma unidade experimental composta por um floculador para testes de bancada em escala de laboratório do tipo *Jar-test*, marca D.Tomé, conforme Figura 3.8, o qual apresenta as seguintes características:

- Ajuste contínuo de velocidade variando de 20 a 120 rpm com variação menor que 17%;
- Rotor de agitação em aço inox com diâmetro de 7,6 cm e área de 45,3cm²;
- Seis Beckers de vidro com capacidade para um litro cada;
- Distribuidor simultâneo de dosagem;
- Sistema de agitação por tração mecânica

3.1.3.4. Osmose reversa

Durante os testes foram utilizados dois tipos de filtros para o pré-tratamento e duas membranas de osmose reversa fornecidos pela empresa Permution E. J. Krieger & Cia LTDA, situada na CIC, com as seguintes características:

- Filtro de polipropileno
 - Marca: Pentek Filtration, modelo: POLYDEPTH® PD-5-934;
 - Faixa de operação: 5 µm;
 - Pressão de operação: 0,14 bar;
 - Vazão: 19 L/min;
 - Temperatura de operação: de 4,4 a 79,4 °C;
 - Dimensões: diâmetro de 64 mm x 251 mm de altura;
 - Materiais usados na fabricação: núcleo e meio filtrante em polipropileno.

- Filtro cartucho de carvão ativado em pó
 - Marca: Pentek Filtration, modelo: Deluxe C-Séries C1;
 - Faixa de operação: 5 µm;
 - Pressão de operação: 0,3 bar;
 - Vazão: 19 L/min;
 - Volume máximo filtrado na redução do sabor e odor de cloro: 9.500 L;
 - Vazão de trabalho para redução do sabor e odor de cloro: 3,8 L/min;
 - Temperatura de operação: de 4,4 a 51,7 °C;
 - Dimensões: diâmetro de 64 mm x 248 mm de altura;
 - Materiais usados na fabricação: meio filtrante em celulose impregnada com CAP, núcleo em polipropileno, terminais em vinil plastisol, malha externa em polietileno, camada de reforço em poliéster celulose e vedação em borracha sintética (Buna-N).

- Membrana de osmose reversa
 - Marca: CSM®, modelo: RE1812-80;
 - Tipo de membrana: TFC (Thin Film Composite);
 - Material e configuração da membrana: poliamida enrolada em espiral;
 - Carga superficial da membrana: negativa;
 - Rejeição ao NaCl: 96%;
 - Pressão máxima de operação: 8,62 bar;

- Vazão máxima de alimentação: 450 L/h;
- Vazão do permeado: 12,60 L/h;
- Temperatura máxima de operação: 45 °C;
- Faixa de operação do pH: 3,0 a 10,0;
- Turbidez máxima: 1,0 NTU;
- Concentração máxima de cloro livre: 0,1 mg/L;
- Dimensões: diâmetro de 46 mm x 305 mm de altura;
- Área: não divulgada.

FIGURA 3.8 – APARELHO TIPO *JAR-TEST* USADO DURANTE OS ENSAIOS DE COM DIÓXIDO DE CLORO



Para viabilizar o processo de filtração do efluente foi utilizado um tanque com sistema de filtração acoplado a uma unidade de osmose reversa cedidos pela empresa Permutation E. J. Krieger & Cia LTDA.

A unidade de bancada possuía as seguintes características:

- Tanque de alimentação com capacidade para 20 litros contendo válvula de drenagem;
- Bomba 1: tipo centrífuga de baixa potência, marca Sictell cód 290429, tensão 110V, frequência 60Hz, potência 36 Watts e corrente de 0,6A;
- Filtro de polipropileno (já caracterizado nesta seção) seguido de válvula de esfera de ½" para coleta de efluente;

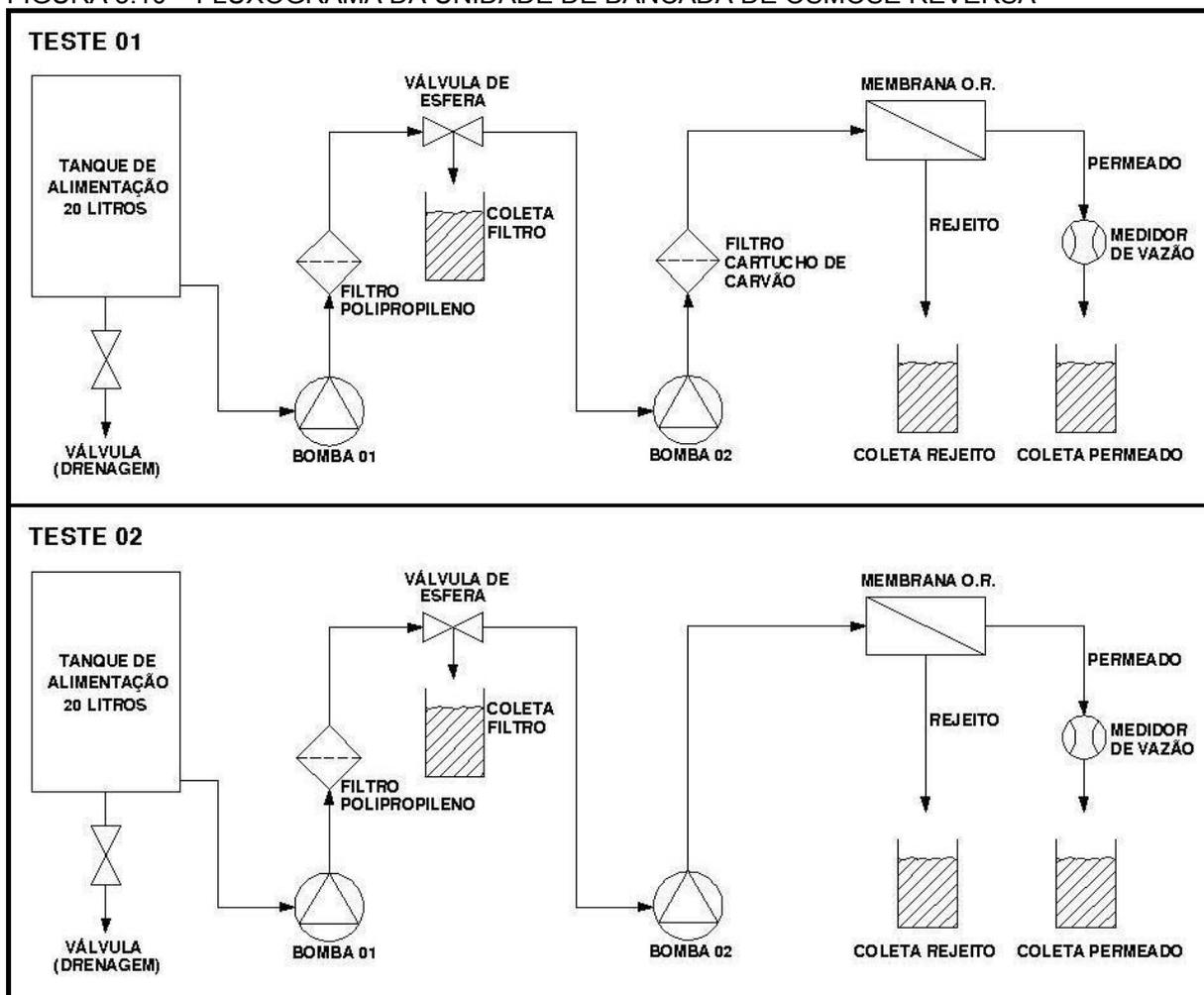
- Bomba 2: tipo diafragma, marca Deng Yuan, modelo TYP-2600, n.º série 2004 12, tensão AC 220V / 24V DC, frequência 50/60 Hz, pressão de 5,51 bar, fluxo aberto em 1,6 L/min e corrente de 0,7 A;
- Filtro cartucho de carvão ativado em pó (já caracterizado nesta seção) usado para filtragem de cloro livre;
- Membrana de osmose reversa (já caracterizado nesta seção);
- Medidor de vazão/rotâmetro marca CENCO – Central Scientific Company, n.º 20.730, série n.º 385.634 com escala de 0 a 15 L.O₂/min posicionado na saída do permeado para aferição da vazão.

A Figura 3.9 e o fluxograma apresentado na Figura 3.10 mostram como o sistema foi configurado durante os dois testes.

FIGURA 3.9 – UNIDADE DE BANCADA DE OSMOSE REVERSA (D) PRECEDIDA POR TANQUE ALIMENTADOR E FILTRO DE POLIPROPILENO (E)



FIGURA 3.10 – FLUXOGRAMA DA UNIDADE DE BANCADA DE OSMOSE REVERSA



3.1.3.5. Coagulação – Floculação

Para o tratamento de coagulação-floculação foram realizados três testes utilizando como coagulante os seguintes produtos:

a) Sulfato de alumínio P.A. cristalizado, comercializado pela empresa Quimibrás Indústria Química S.A. contendo as seguintes características expressas no rótulo:

- Fórmula: $Al_2(SO_4)_3 - 14 \text{ a } 18 H_2O$.
- Especificações A.C.S.:
 - Dosagem: 98 a 102%;
 - Limite máximo de impurezas: Cloreto (Cl) 0,005%; Arsênio (As) 0,5ppm; Insolúveis 0,01%;
 - Substâncias não precipitáveis por NH_4OH (como SO_4) 0,2%;

- Metais pesados (como Pb) 0,001%;
- Ferro (Fe) 0,002%;
- pH (solução a 1%): 3,80.

b) BetzDearborn PE019: coagulante sintético formulado com poliamina em meio ácido. Produzido pela GE Betz, este coagulante possui carga catiônica e possui baixo peso molecular. Pode ser aplicado tanto para o tratamento de água como de efluentes. Abaixo as principais características físico-químicas fornecidas:

- Estado físico: líquido;
- Cor: ambar;
- pH (xarope sem diluição): 0,95;
- pH (1% aquoso): 4,10.

c) Bufloc 5122: coagulante sintético catiônico formulado com poliamina produzido pela empresa Buckman laboratórios Ltda. Abaixo as principais características físico-químicas fornecidas:

- Nome Químico: Hidroxicloreto de Alumínio (polimérico);
- Cor: ambar;
- Odor: levemente picante;
- pH (xarope sem diluição): 0,55;
- pH (1% aquoso): 3,40 a 4,20;
- Ponto de fulgor (copo fechado): > 93,3°C;
- Ponto de ebulição: 105°C;
- Densidade (20°C) g/mL: 1,20 a 1,40.

O Quadro 3.4 apresenta as características dos coagulantes e auxiliares de coagulação usados nos testes de tratabilidade em bancada.

QUADRO 3.4 – RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS COAGULANTES E POLIELETRÓLITOS USADOS NO JAR-TEST

Produto	Fabricante	Base do produto	Densidade	Carga elétrica	Peso molecular	Forma de apresentação	Mercado de Aplicação	Observações
Bufloc 565	Buckman	(1)	Baixa	Aniônico	Alto	Emulsão	ETE e Papel	30% densidade de carga
Bufloc 5122	Buckman	(2)	Alta	Catiônico	Baixo	Líquido	ETE e Papel	-
PE019	GE Betz	(2)	NI	Catiônico	Baixo	Líquido	ETA e ETE	-
F11	GE Betz	(1)	NI	Aniônico	Alto	Pó	ETA e ETE	-

(1): Poliacrilamida, (2): Poliamina, NI: Não Informado

3.1.3.5.1 Auxiliares de Coagulação

Para auxiliar a coagulação foram utilizados os seguintes produtos:

a) BetzDearborn F11: auxiliar de coagulação sintético aniônico formulado com poliacrilamida produzido pela GE Betz. Possui alto peso molecular e pode ser aplicado tanto para o tratamento de água como de efluentes. Abaixo as principais características físico-químicas fornecidas:

- Cor: branco;
- pH (solução a 0,1%): 6,00.

b) Bufloc 565: auxiliar de coagulação sintético aniônico formulado com poliacrilamida produzido pela empresa Buckman laboratórios Ltda. Abaixo as principais características físico-químicas fornecidas:

- Nome Químico: Destilado de petróleo;
- Concentração: 20 a 25%;
- Cor: Opaca;
- Odor: Hidrocarboneto fraco;
- pH (emulsão sem diluição): 7,80;
- pH (solução a 0,1%): 8,00;
- Ponto de fulgor (copo fechado): > 93°C;
- Ponto de ebulição: > 100°C;
- Densidade (20°C): 1,04 g/mL;

- Solubilidade: < 10% a 25°C;
- Viscosidade de Brookfield (25°C): 400 – 2500 cP.

Para os ensaios de coagulação, floculação e sedimentação utilizou-se a unidade experimental tipo *Jar-test* (Figura 3.11) de características idênticas ao usado para o teste oxidação com dióxido de cloro já descrita no item 3.1.3.3.

Este equipamento possibilitou a aplicação da norma técnica CETESB nº L5.006 – Floculação: Método de Ensaio, homologada em 03.07.1979.

FIGURA 3.11 – APARELHO TIPO *JAR-TEST* USADO DURANTE OS ENSAIOS DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO EM BANCADA



3.1.4. Equipamentos

Os equipamentos utilizados para a medição dos parâmetros controlados durante o teste foram:

- Termômetro e condutivímetro digital marca SCHOTT Glaswerke Mainz, modelo Handylab LF1 com célula de condutividade modelo LF 613T;
- pHmetro digital marca PHTEK, modelo PHS-3B;
- Turbidímetro marca DEL LAB, modelo DLM 2000B (microprocessado);
- Analisador de carbono orgânico (TOTAL ORGANIC MATTER) marca Shimadzu, modelo TOC-V CPH;
- Balança analítica digital marca SARTORIUS, modelo BL210S;

- Estufa marca ODONTOBRÁS, modelo 1.1;
- Medidor/comparador de cor tipo Aqua Tester marca DEL LAB, modelo DNLH - 100;
- Colorímetro marca HACH, modelo DR/890 com calibração de leitura para 530nm.

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Métodos para caracterização do efluente

Para a caracterização do efluente, a fim de evitar efeitos de variações nas características físico-químicas provocada pela volatilização, foram analisados em todas as etapas os parâmetros de interesse tanto na entrada quanto na saída do tratamento para determinar a remoção real ocorrida com a técnica empregada. As análises físico-químicas e microbiológicas e a metodologia empregada na sua determinação foram as seguintes:

- Temperatura – método termométrico;
- pH – método potenciométrico;
- Turbidez – método nefelométrico;
- Condutividade – método potenciométrico;
- Cor – método de comparação visual;
- DQO – método do refluxo aberto;
- DBO₅ – método de DBO de cinco dias;
- Carbono total – método da oxidação por auxílio da combustão catalítica;
- Carbono orgânico total – método da oxidação por auxílio da combustão catalítica;
- Carbono inorgânico – método da oxidação por auxílio da combustão catalítica;
- Sólidos totais – método gravimétrico;
- Sólidos suspensos totais – método gravimétrico;
- Sólidos dissolvidos totais – método gravimétrico;

- Coliformes totais e fecais – método tubos múltiplos e substrato enzimático.

As análises foram realizadas de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998), no Laboratório Prof. Francisco Borsari Netto – LABEAM do Departamento de Hidráulica e Saneamento e no laboratório do CEPPA localizado na Usina Piloto B da UFPR.

3.2.1.1. pH

A uma dada temperatura, a intensidade da característica ácida ou básica de uma solução é indicada pelo pH, que é definido como um fator de intensidade de acidez. A determinação do pH foi feita com sistema de eletrodo de vidro.

3.2.1.2. Turbidez

O método nefelométrico é um método secundário, indireto. Baseia-se na leitura de intensidade da luz dispersa pela amostra, em ângulo de 90°, com a direção da luz incidente, em relação à intensidade da luz dispersa por uma suspensão padrão nas mesmas condições. A suspensão-padrão de referência utilizada foi a formalina. A determinação da turbidez foi feita com turbidímetro digital.

3.2.1.3. Condutividade

A condutância específica resulta da soma das contribuições de todos os íons presentes na amostra e sua variação ocorre com a variação da concentração dos íons presentes. O método potenciométrico foi utilizado para obtenção da condutividade. Esta, então, foi determinada através da introdução direta da célula medidora dentro da amostra, tomando o cuidado para homogeneizar a amostra. A célula transmite as informações ao aparelho que decodifica e apresenta no display digital, em tempo real, a condutividade em $\mu\text{S}/\text{cm}$ e a temperatura em $^{\circ}\text{C}$. Os resultados apresentados são considerados finais, visto que o equipamento possui sistema automático de compensação de temperatura e de escolha das constantes de condutividade.

3.2.1.4. Cor

A cor é determinada pela comparação visual da amostra com soluções padronizadas de cloroplatinato de potássio tingido com pequenas quantidades de

cloreto de cobalto (padrão Platina-Cobalto). A cor produzida por 1 mg/L de platina, em combinação com 0,5 mg/L de cobalto metálico, é considerada uma unidade padrão de cor. O aparelho utilizado para determinação de cor era do tipo Aqua Tester e o disco colorimétrico com escala de cor de zero a 100 com variações de 2,5 unidades até 10 e de 10 unidades até 100. Se a amostra apresentava coloração intermediária, fazia-se diluição da amostra.

3.2.1.5. DQO

A demanda química de oxigênio é um método indireto para quantificação da matéria orgânica ou do seu potencial poluidor, devido à grande dificuldade na determinação laboratorial dos diversos componentes da matéria orgânica nas águas residuárias, visto a multiplicidade de formas e composto em que a mesma pode-se apresentar. O método utilizado para determinação da DQO foi por refluxo aberto, no qual a matéria orgânica e inorgânica são oxidadas por uma quantidade conhecida de um agente oxidante forte, o dicromato de potássio, em meio ácido, a quente, em refluxo por duas horas, na presença de catalisador sulfato de prata. O excesso de dicromato de potássio é titulado com sulfato ferroso amoniacal, usando ferroin como indicador. A quantidade de matéria oxidável, expressa como equivalente em oxigênio, é proporcional à quantidade de dicromato de potássio consumida.

3.2.1.6. DBO₅

A demanda bioquímica de oxigênio – DBO é um teste importante para conhecer a força do efluente, particularmente seu conteúdo de matéria orgânica biodegradável. É definida como a quantidade de oxigênio, expressa em mg/L, necessária para estabilizar (oxidar) a matéria orgânica, através do metabolismo de microorganismos, principalmente bactérias, num período de cinco dias a 20°C. Uma amostra, ou diluições apropriadas da mesma, é colocada dentro de dois frascos de DBO de 300mL com água de diluição e reagentes e determinada sua OD imediatamente. Outros dois frascos, também com amostra, são incubados por cinco dias. A diferença entre as concentrações de oxigênio no início e no fim do período de incubação corresponde à demanda bioquímica de oxigênio.

3.2.1.7. CT, COT, CI

As análises de carbono orgânico total (COT) foram baseadas na oxidação quantitativa da matéria orgânica contida na solução em análise e na determinação da concentração de CO₂ produzido, o qual é correlacionado ao valor total de carbono orgânico da amostra. O método utilizado para a determinação do COT foi o TC-IC (ou CT-CI), que adota a quantificação de carbono total (CT) e inorgânico (CI) presentes na amostra. O resultado para a concentração do COT é representado pela subtração entre valores de CT e CI.

3.2.1.8. Sólidos totais

Entende-se por sólidos totais o resíduo acumulado em cápsula, proveniente de uma determinada alíquota homogênea, após evaporação até secura em banho-maria. Após a secura, é promovida a secagem da cápsula em estufa a 103-5°C por uma hora. Após mais 30 minutos em dessecador para resfriamento, pesa-se a cápsula. O valor dos sólidos totais é o resultado do peso da cápsula com resíduo, menos o peso da cápsula vazia, multiplicado por um milhão e dividido pelo volume da alíquota.

3.2.1.9. Sólidos suspensos totais

Entende-se por sólidos suspensos totais o resíduo retido em papel filtro fibra de vidro, após passagem da amostra, com posterior secagem em estufa a 103-5°C por uma hora. Após mais 30 minutos em dessecador para resfriamento, pesa-se a amostra. O valor dos sólidos suspensos totais é o resultado do peso da cápsula com resíduo, menos o peso da cápsula vazia, multiplicado por um milhão e dividido pelo volume da amostra filtrada.

3.2.1.10. Sólidos dissolvidos totais

Entende-se por sólidos dissolvidos totais o resíduo passante pelo papel filtro fibra de vidro, após passagem da amostra. A amostra filtrada é colocada em cápsula e evaporada até secura em banho-maria. A seguir é promovida a secagem da cápsula em estufa a 103-5°C por uma hora. Após mais 30 minutos em dessecador para resfriamento, pesa-se a cápsula. O valor dos sólidos dissolvidos totais é o

resultado do peso da cápsula com resíduo, menos o peso da cápsula vazia, multiplicado por um milhão e dividido pelo volume da amostra filtrada.

3.2.1.11. Coliformes totais e fecais

A técnica de fermentação em tubos múltiplos consiste em tratar a amostra em um conjunto de tubos padrão contendo nutrientes para que, após o crescimento da colônia verifica-se a presença ou não de gás e ácidos no tubo e isto determina o tipo de bactéria existente. Confirmada a existência, deve-se analisar a densidade (qualidade e quantidade) das espécies encontradas nas condições específicas do ensaio. Em seguida os tubos de interesse são submetidos a testes com temperatura elevada e comparação com meios de cultura de *Escherichia coli* para determinação de coliformes fecais. Já a técnica do teste de coliformes em substrato enzimático consiste em usar substratos cromogênicos do tipo ONPG ou CPRG para detectar enzimas β -D-galactosidase que são produzidas pelos coliformes totais. Esta enzima hidroliza o substrato e produz uma alteração de cor que indica teste positivo para CT_M em 24 horas (ONPG) ou 28 horas (CPRG). Para CF é usado um substrato fluorogênico (MUG) para detectar a enzima β -glucuronidase que é produzida pela *E. coli*. Esta enzima hidrolisa o substrato produzindo fluorescência que pode ser vista por raio ultravioleta. Sua presença indica teste positivo para *E. coli*. As duas técnicas descritas acima foram utilizadas para a determinação de CT_M e CF.

Os testes de tratabilidade em escala de bancada e as simulações em unidades piloto ocorreram nos laboratórios das empresas fornecedoras das tecnologias para a pesquisa.

3.2.2. Metodologia empregada para as tecnologias

3.2.2.1. Adsorção em Carvão Ativado

Os testes de batelada para definir o tempo de contato ótimo com o carvão ativado, a taxa de adsorção em escala de bancada e conseqüentemente a efetividade do tratamento com carvão foram executados no laboratório da empresa Indústrias Químicas Carbomafra na Cidade Industrial de Curitiba, como segue:

3.2.2.1.1 Determinação do tempo de contato

Na determinação do tempo de contato com o carvão ativado, foi seguido o seguinte roteiro adaptado de SANTANA (2001):

- Misturar 2,0 g de carvão em grão moído passante em malha 325 (ASTM), em 400 mL de amostra;
- Repetir a mistura em nove copos de Becker;
- Promover agitação controlada, com tempos de retenção diferentes em cada copo de Becker, variando em 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 75 e 90 minutos;
- Filtrar a água, em papel qualitativo marca Frama, separando o carvão da amostra e analisar a DQO, cor, COT, turbidez, CT_M/CF e pH residual (Figura 3.12);
- O menor tempo com os valores iguais de DQO foi considerado o tempo de contato.

FIGURA 3.12 – PROCEDIMENTO DE FILTRAGEM DO EFLUENTE PARA RETIRADA DO CARVÃO ATIVADO



3.2.2.1.2 Determinação da taxa de adsorção

Na determinação da taxa de adsorção do carvão ativado, foi seguido o seguinte roteiro:

- Pesar os percentuais em peso de carvão referente ao volume da amostra 0,0125% (0,05g), 0,025% (0,10g), 0,05% (0,20g), 0,075% (0,30g), 0,10% (0,40g), 0,15% (0,60g), 0,20% (0,80g) e 0,25% (1,00g), 0,3% (1,20g), 0,35% (1,40g) e 0,40% (1,60g) de carvão em grão moído em onze copos de Becker diferentes;
- Adicionar 400mL da amostra, agitando pelo tempo de contato pré-estabelecido no item 3.2.2.1.1;
- Filtrar a água, em papel qualitativo marca Frama, medir a DQO, COT, turbidez e pH residual e expressar em gráfico DQO residual versus massa de carvão (Figura 3.12);
- Eleger, para efeito de cálculo da taxa de adsorção, a massa de carvão ativado onde o teor de DQO do filtrado seja igual a zero, ou a menor massa das que tiveram valores iguais ou próximos de DQO;
- Calcular a taxa de adsorção através da Equação 3.1:

$$T. A. (\% \text{ peso}) = \frac{C_o (g) - C_f (g)}{\text{Massa de CA}(g)} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde: C_o = concentração de DQO inicial em gramas;

C_f = concentração de DQO final em gramas;

CA = massa de carvão ativado em gramas;

3.2.2.2. Oxidação via ozonização

Os ensaios de oxidação com ozônio foram efetuados sob orientação do representante da empresa fornecedora da unidade de bancada.

Foram efetuados dois testes um com efluente tratado e outro com efluente tratado e filtrado em papel filtro quantitativo com as seguintes características:

- Marca: Framex;
- Dimensões: $\varnothing 12,5 \pm 0,10$ cm;
- 389² - Faixa branca - 6,0 μ m;
- Cinza: $\leq 0,0009$ g.

A unidade de bancada utilizou oxigênio como base para geração do ozônio. O ozônio gerado foi injetado através de um difusor cerâmico posicionado no fundo da coluna e o tratamento era feito em batelada com volume de 11,04 litros de efluente. A duração dos testes teve tempo total de 15 minutos cada, sendo retirada uma alíquota de 500 mL para análise através de uma válvula localizada no centro da coluna com os tempos de 1, 2, 4, 6, 8, 10 e 15 minutos. A dosagem de ozônio gerado durante os testes era fixa e a temperatura das amostras durante os testes era de 22 °C. Os principais dados relativos ao ensaio podem ser visualizados no Quadro 3.5.

QUADRO 3.5 – DADOS REFERENTE AO ENSAIO DE OZONIZAÇÃO

Dados do Ensaio	Unidades	Valores
Vazão de oxigênio no gerador	Nm ³ /h	0,68
Pressão do oxigênio no gerador	bar	1,034
Volume da amostra na coluna	litros	11,04
Vazão de oxigênio	L/min	11,33
Massa específica de O ₂	g/L	1,32
Porcentual de ozônio gerado	%	1,00
Massa de ozônio	mg/min	149,50
Dosagem específica de ozônio	mg/L.min	13,50
Volume da alíquota retirada	mL	500,00

3.2.2.3. Oxidação via dióxido de cloro

Foram efetuados dois testes de oxidação com dióxido de cloro, o primeiro com efluente tratado e segundo com efluente tratado e filtrado em filtro de polipropileno de características idênticas ao usado para o teste de osmose reversa descrito no item 3.1.3.4. Os ensaios foram efetuados sob orientação do engenheiro responsável da empresa fornecedora do dióxido de cloro e seguiram a seguinte metodologia de análise.

3.2.2.3.1 Determinação da demanda de dióxido de cloro

Para a determinação da demanda de dióxido de cloro primeiramente coletou-se do gerador SVP-Pure[®] um litro de solução concentrada de ClO₂ e analisou-se sua concentração, a qual resultou em 345 ppm. Depois foram adicionadas doses de 5 ppm da solução de ClO₂ em um jarro contendo 800 mL de amostra tratada e outro com amostra tratada e filtrada. Os jarros foram protegidos por papel alumínio para reduzir possível volatilização do oxidante devido efeitos da luminosidade. A mistura foi agitada por um minuto a 20 rpm e, depois, durante o tempo de contato,

permaneceu sem agitação. Foram coletadas amostras de 25 mL com pipeta volumétrica em tempos de contato 5, 15, 30, 45 e 60 minutos e preparadas para análise em colorímetro. O resultado obtido era o residual de ClO_2 remanescente na amostra. O consumo de ClO_2 foi obtido subtraindo o valor da dose aplicada no efluente de seu residual na amostra. O mesmo procedimento foi aplicado para os testes com o efluente tratado e filtrado.

3.2.2.3.2 Determinação do CT_D

Para a obtenção da dosagem ideal de ClO_2 a ser aplicada e seu tempo ótimo de contato considerou-se que o residual de ClO_2 após a desinfecção e oxidação da matéria orgânica na amostra de efluente deveria ficar estável dentro de uma faixa acima de 0,10 ppm, conforme informações do fornecedor do dióxido de cloro e inferior a 0,8 ppm que é o valor máximo permitido para o lançamento do residual de ClO_2 após desinfecção segundo a EPA (1994). O cálculo do CT_D para o efluente em questão pode é obtido pela Equação 3.3:

$$\text{CT}_D = \text{Concentração (mg/L)} \times \text{Tempo (min)} \quad (3.3)$$

3.2.2.3.3 Ensaio com dióxido de cloro

Após determinada a dose ideal e o tempo de contato ótimo de oxidação partiu-se para a execução dos testes com o efluente tratado e tratado e filtrado. Adicionou-se uma dose de 5 ppm da solução de ClO_2 em três jarros contendo 900 mL de amostra tratada e 5 ppm também em três jarros contendo 900 mL de amostra filtrada. A mistura dos seis jarros foi agitada por um minuto à 20 rpm e, depois, permaneceu sem agitação por 60 minutos. Terminado o tempo de contato, coletou-se uma alíquota de 600 mL de cada jarro e se procedeu as análises laboratoriais.

3.2.2.4. Osmose Reversa

Foram realizados dois testes contínuos com a unidade de osmose reversa, onde cada um deles contou com o uso uma membrana nova de características idênticas. O que diferiu os dois testes foi que no segundo retirou-se o filtro cartucho de carvão ativado para poder ter a real noção da capacidade de tratamento da membrana atuando sem a colaboração deste filtro. A configuração da unidade usada

nos dois testes é apresentada no fluxograma da Figura 3.8. Os testes seguiram a seguinte metodologia de análise.

3.2.2.4.1 Limpeza e determinação da vazão efetiva do sistema

A limpeza do sistema se fez necessária pois a membrana foi fornecida dentro de uma embalagem contendo uma solução protetora que evita possíveis danos à mesma por crescimento biológico e/ou a eventual congelamento durante o transporte. Segundo o fabricante, o permeado da primeira hora de funcionamento deve ser descartado devido ao enxágüe da membrana e outros elementos do sistema. Esta limpeza foi feita com água deionizada durante uma hora e meia e aproveitou-se para medir a vazão do permeado e do rejeito através de cronômetro e de copo de Becker de 1000 mL. A vazão média obtida ficou em torno de 12 L/h para o permeado e 10 L/h para o rejeito. Após medida a vazão entrou-se em contato com o fornecedor do sistema, e este informou que a vazão para efluente seria de 50% da vazão quando usada água potável.

3.2.2.4.2 Testes contínuos de osmose reversa

Para a determinação dos testes contínuos com o sistema de osmose reversa levaram-se em consideração três aspectos básicos: (1) a vazão estimada do sistema de osmose reversa para o efluente, (2) a limitação do volume de amostra para cada teste, que era de 40 litros e (3) a configuração da bomba diafragma que gerava em torno de 5,5 bar de pressão. Como a bomba não gerava alta pressão, a configuração de circuito fechado com o retorno do rejeito para o tanque de alimentação não seria possível, pois apenas bombas de alta pressão viabilizam esta configuração (MADAENI, 2003). Então, com uma vazão estimada de 11 L/h e 40 litros de efluente, optou-se pelo circuito aberto filtrando o efluente durante três horas descartando tanto o permeado quanto o rejeito. A temperatura da amostra durante os testes, no tanque de alimentação, era de 20 °C.

3.2.2.5. Coagulação – Floculação

Foram realizados três testes com coagulantes e polieletrólitos de diferentes marcas os quais seguiram a seguinte metodologia de análise.

3.2.2.5.1 Determinação da melhor faixa de pH e do tempo de sedimentação

Para otimizar o desempenho dos coagulantes estudados foi determinada a melhor faixa de pH. Para tanto foi adicionada uma concentração de 200 ppm do coagulante nos seis jarros contendo 500 mL de amostra. Após homogeneização foram adicionadas concentrações variadas de ácido sulfúrico – H_2SO_4 , que determinaram uma variação do pH de 5,0 a 9,0, com intervalos de 1,0. Em um dos jarros foi mantido o pH natural do efluente. A solução foi agitada a 120 rpm por 3 minutos e posterior agitação lenta (20 rpm) por mais 3 minutos para facilitar a floculação sem romper os flocos formados. Terminada a fase de agitação lenta aguardou-se 5, 15, 30 e 60 minutos para decantação do lodo e analisou-se a formação dos flocos, o pH de operação, a turbidez e a DQO a cada intervalo, conseguindo-se, assim, determinar o melhor tempo de sedimentação e o jarro com pH de melhor tratabilidade (AZEVEDO NETTO, *et al.*, 1979). O critério escolhido para selecionar o melhor jarro foi o que obteve a menor DQO e em seguida a menor turbidez.

Após a escolha do tempo de sedimentação ideal e do jarro com pH contendo melhor desempenho repetiu-se o teste de pH do melhor jarro variando o seu intervalo em 0,5 ponto para menos e para mais, no intuito de confirmar o pH ideal com um espectro menor de intervalo.

3.2.2.5.2 Determinação da concentração dos coagulantes

Após conhecido o pH ideal e o tempo de sedimentação ótimo para cada teste, realizaram-se os ensaios para determinar a concentração ideal de coagulante para melhor remoção dos contaminantes da água. A escolha das faixas de concentrações e preparação de cada coagulante foi obtida através de consulta aos catálogos fornecidos pelas empresas GE Betz e Buckman e posterior consulta via telefone a seus representantes regionais. O critério de escolha da melhor concentração seria o jarro que proporcionasse a menor DQO.

Para o teste 01, primeiramente foram adicionadas concentrações de 50, 100, 200, 300, 400 e 500 ppm de coagulante PE019 aos jarros com 500 mL de amostra, já com pH ótimo. Os jarros com 100 e 200 ppm apresentaram melhor desempenho e então foi feito o teste utilizando concentração que iam de 100 a 200 ppm com

intervalos de 20 ppm. No teste 02, as concentrações iniciais de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ foram 10, 50, 100, 200, 400 e 600 ppm. Neste caso, os jarros com 50 e 100 ppm apresentaram melhor desempenho e então foi refeito o teste utilizando concentração que iam de 40 a 100 ppm com intervalos de 10 ppm. Por fim, no teste 03, foram adicionadas concentrações de 10, 50, 100, 150, 400 e 600 ppm de coagulante Bufloc 5122. Os jarros com 100 e 150 ppm apresentaram melhor desempenho sendo considerado o jarro com 150 ppm o mais apropriado.

Os procedimentos de coagulação, floculação, decantação e coleta do sobrenadante para a avaliação físico-química, foram feitos conforme descrito em AZEVEDO NETTO, *et al.*, (1979).

3.2.2.5.3 Determinação da concentração dos auxiliares de coagulação

De posse da concentração ótima de cada coagulante nos três testes efetuados, partiu-se para a determinação da concentração ideal dos auxiliares de coagulação. Neste caso, como no caso dos coagulantes, a escolha das faixas de concentração e preparação de cada produto foi obtida através de consulta aos catálogos e a seus representantes regionais.

Para o teste 01, foram adicionadas concentrações de 0,10, 0,50, 1,00, 2,00, 4,00 e 10,0 ppm do polímero F11 aos jarros com 500 mL de amostra, já com pH ótimo corrigido e coagulante PE 019 adicionado. Os jarros com 0,10 e 0,50 ppm apresentaram melhor desempenho e então foi refeito o teste utilizando concentrações de 0,10, 0,25, 0,50, 0,75, 1,00 e 1,50 ppm para concentrar o espectro de análise nos jarros com melhor desempenho. No teste 02, o procedimento e as concentrações do polímero F11 aplicadas foram as mesmas do teste 01, sendo alterado o coagulante, que neste caso foi o sulfato de alumínio P.A. ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). No teste 03, foram adicionadas concentrações de 0,50, 1,00, 2,00, 4,00, 6,00 e 10,0 ppm do polímero Bufloc 565 aos jarros com 500 mL de amostra, já com pH ótimo corrigido e coagulante Bufloc 5122. Ao término de cada teste analisaram-se os mesmos parâmetros analisados na determinação da concentração ótima do coagulante.

3.2.3. Avaliação de custos diretos das tecnologias

Para a avaliação de custos apresentada a seguir levaram-se em consideração os custos dos equipamentos (capital fixo) a serem adquiridos em cada tecnologia específica e os custos de manutenção, operação, de insumos no tratamento e o custo da energia. Neste estudo não foram considerados os custos de **infraestrutura** para implantação ou adaptação para receber os sistemas de reúso como possíveis tanques pulmão, tubulações e conexões para levar o efluente até a estação de reúso e aos pontos de consumo. Custos secundários de manutenção e consumo de energia desta infraestrutura também não foram considerados.

A metodologia para o levantamento dos custos envolvidos em cada item do tratamento é apresentada como segue:

- Capital fixo: o custo dos equipamentos foi obtido através de consulta às empresas fornecedoras das tecnologias deste estudo e a empresas parceiras indicadas por estas. Foram levadas em consideração as características do efluente tratado, os dados obtidos nos ensaios de bancada para cada tecnologia e uma vazão contínua de projeto de $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$, que compreende as demandas diárias do processo de pintura, torres de resfriamento e lavagem de piso industrial;
- Depreciação: o tempo de depreciação utilizado para o capital fixo investido foi de dez anos, que, segundo PETERS e TIMMERHAUS (1991), é o tempo usualmente aplicado para estações de tratamento de efluentes;
- Custo de manutenção: o custo de manutenção de bombas; tubulações e acessórios (manômetros, medidores de vazão, entre outros) e tanques e reservatórios foram obtidos segundo PETERS e TIMMERHAUS (1991), que são apresentados por meio de percentuais sobre o valor do capital fixo;
- Custo de operação: Para a estação de coagulação/floculação serão necessários dois operadores para o controle ficando 100% de suas jornadas de trabalho diária destinada à operação da estação. Para a estação de osmose reversa foi locado um operador com 50% de sua jornada destinada à estação e para o restante das estações de reúso se faz necessário apenas um operador ficando 20% de sua jornada destinada à operação da estação.

As informações sobre a quantidade de pessoas e o tempo despendido em cada uma das tecnologias, foram repassadas pelas empresas fornecedoras dos equipamentos. Para o cálculo foi considerado o salário padrão da categoria adicionando-se 105% de encargos sociais sobre o valor salarial;

- Custo dos insumos: os custos foram obtidos através da seguinte composição: (1) especificações e estimativas de substituição dos produtos informados pelas empresas fornecedoras das tecnologias; (2) pela capacidade de adsorção da DQO por grama de carvão, no caso dos testes com carvão ativado; (3) pelo consumo específico de oxidantes durante os testes, no caso do ozônio e ClO_2 , e; (4) pelo consumo de produtos químicos durante o *jar-test*, no caso dos testes de coagulação-floculação. Aqui também foram levadas em consideração as características do efluente tratado e a vazão contínua de projeto de $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$;
- Custo de energia: o custo do kWh foi obtido através de consulta a concessionária fornecedora de energia do Paraná – COPEL. O valor foi baseado na média anual das tarifas de período seco (maio à novembro), período seco de ponta (maio à novembro entre 18 e 21 horas), período úmido (dezembro à abril) e período úmido de ponta (dezembro à abril entre 18 e 21 horas) aplicadas ao contrato da empresa. No custo também foram somados os valores da demanda de energia contratada dentro e fora do período de ponta.

Para a conversão dos valores em reais para dólar americano, foi considerada a cotação do dia 30/10/2006 consultada no site oficial do Banco Central do Brasil.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

Para efeito de comparação com os resultados dos ensaios realizados neste trabalho, o Quadro 4.1 apresenta os valores médios de cada parâmetro caracterizado referente às seis coletas de efluente tratado e posteriormente filtrado que foram relacionadas no Quadro 3.3.

QUADRO 4.1 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DO EFLUENTE

Parâmetros	Unidade	Valores médios	
		Tratado	Tratado Filtrado
Temperatura	°C	21,00	21,00
pH	-	9,11	9,06
Turbidez	NTU	10,24	2,02
Cor	Hazen	340,83	75,88
DQO	mg/L	132,44	72,61
DBO ₅	mg/L	50,54	23,13
CT	mg/L	89,11	62,53
COT	mg/L	44,76	20,20
Cl	mg/L	44,36	42,33
ST	mg/L	1.617	1.550
SST	mg/L	49	9
SDT	mg/L	1.568	1.541
Coliformes Totais	NMP/100mL	2.620 ⁽¹⁾	N.A.
Coliformes Fecais	NMP/100mL	17,50	N.A.

N.A.: Não avaliado

⁽¹⁾ Observação: Média de cinco coletas. Excluído o valor da 4ª remessa por estar fora dos padrões

4.2. COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS NO EFLUENTE

4.2.1. Adsorção em carvão ativado

No Quadro 4.2 são apresentados os resultados das análises realizadas nos testes de bancada, durante a determinação do tempo de contato ideal para a passagem do efluente por leito de carvão ativado. Pode-se observar que, com o tempo de 10 minutos, a adsorção estava terminada, isto é, o carvão ativado e o efluente tinham alcançado o equilíbrio de reação, uma vez que a capacidade de adsorção do carvão para estas características de efluente atingiu seu limite. Este tempo, de 10 minutos, se situa dentro da faixa sugerida pela literatura para tempos de contato que varia de 10 a 30 minutos, dependendo das características do carvão e do efluente. Deve-se fazer menção apenas para o valor da DQO para o tempo de 15 minutos que teve um pico incomum aos outros resultados a partir de 10 minutos

de tempo de contato. Como os resultados de cor, CT, COT e turbidez confirmaram valores constantes para o mesmo tempo, podemos considerar que o valor de DQO para 15 minutos pode ter sofrido algum tipo de contaminação, resultando em um pequeno aumento na matéria orgânica e conseqüentemente aumento do valor da DQO. Para os cálculos da taxa de adsorção do carvão foi utilizado um tempo de contato de 20 minutos, que é a média entre os extremos sugeridos pela literatura, assim, evitando o pico de DQO duvidoso do tempo de 15 minutos.

No caso dos coliformes totais e fecais, estes parâmetros tiveram suas análises prejudicadas no decorrer do teste, uma vez que na análise do efluente tratado caracterizou-se ausência de CT_M e CF. O único jarro que se obteve valor diferente dos demais foi com 45 minutos, que apresentou CT igual a 170 NMP/100mL. Pode-se dizer que este jarro deva ter sofrido alguma contaminação durante os testes.

QUADRO 4.2 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DO EFLUENTE TRATADO APÓS CONTATO COM CARVÃO ATIVADO DURANTE A DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONTATO EM BATELADA

Tempo de contato (min)	DQO (mg/L)	Cor (Hazen)	CT (mg/L)	COT (mg/L)	CI (mg/L)	Turbidez (NTU)	CT _M /CF (NMP/100ml)	pH	Temp. durante as análises (°C)
0	105,88	400	32,08	27,86	4,22	7,36	< 1/< 1	10,60	25,00
5	11,52	< 2,5	10,52	1,21	9,31	0,51	< 1/< 1	10,37	24,30
10	4,94	< 2,5	8,66	0,60	8,06	0,21	N.A.	10,52	22,00
15	8,23	< 2,5	9,71	0,75	8,96	0,22	N.A.	10,44	21,60
20	4,94	< 2,5	10,61	0,58	10,03	0,13	< 1/< 1	10,39	22,50
30	3,29	< 2,5	9,57	1,08	8,49	0,20	N.A.	10,48	22,30
45	4,01	< 2,5	12,61	2,44	10,16	0,15	170/< 1	10,19	20,60
60	4,01	< 2,5	11,57	1,51	10,05	0,21	N.A.	10,47	21,40
75	4,81	< 2,5	12,56	1,16	11,41	0,15	< 1/< 1	10,32	20,80
90	4,01	< 2,5	11,79	0,79	11,00	0,15	< 1/< 1	10,34	21,50

N.A.: Não avaliado

Observação: Os testes de adsorção foram realizados a uma temperatura do efluente de 30°C

A Figura 4.1 apresenta a queda na concentração da DQO versus o tempo de contato e a Figura 4.2 mostra a queda brusca da cor pelo mesmo tempo de contato, facilitando assim a visualização do equilíbrio da capacidade de adsorção do carvão e confirmando o tempo de contato.

FIGURA 4.1 – VARIAÇÃO DA DQO DURANTE A DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONTATO DO CARVÃO ATIVADO

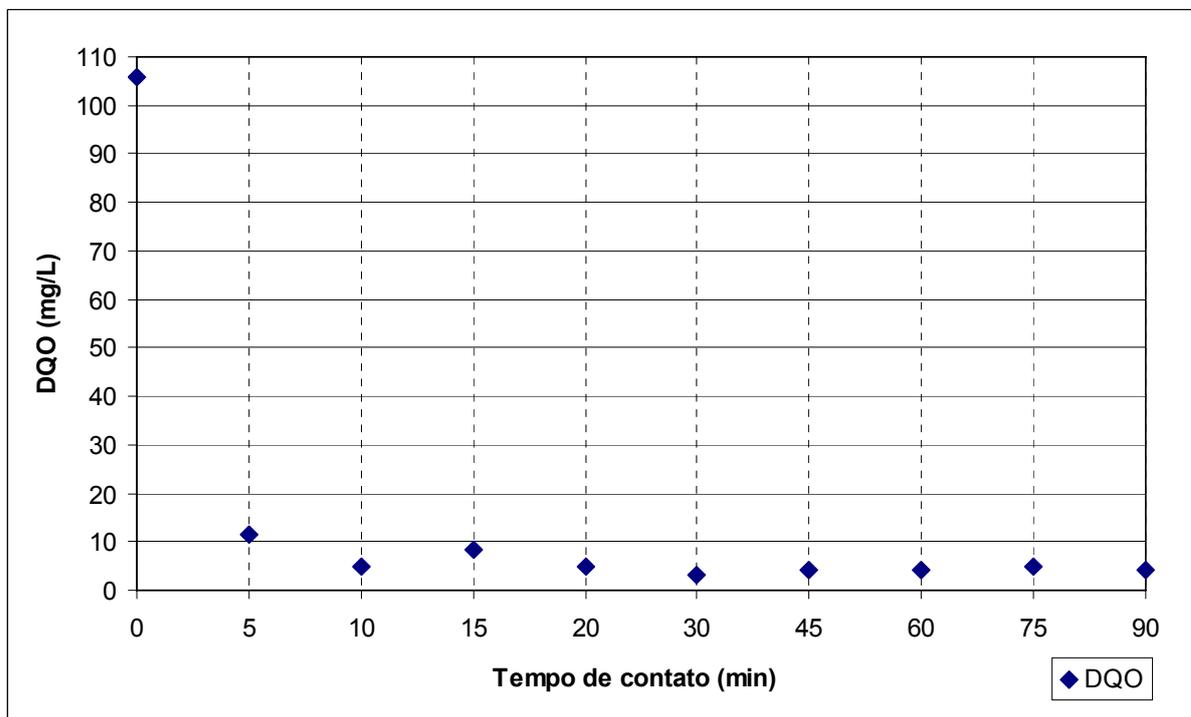
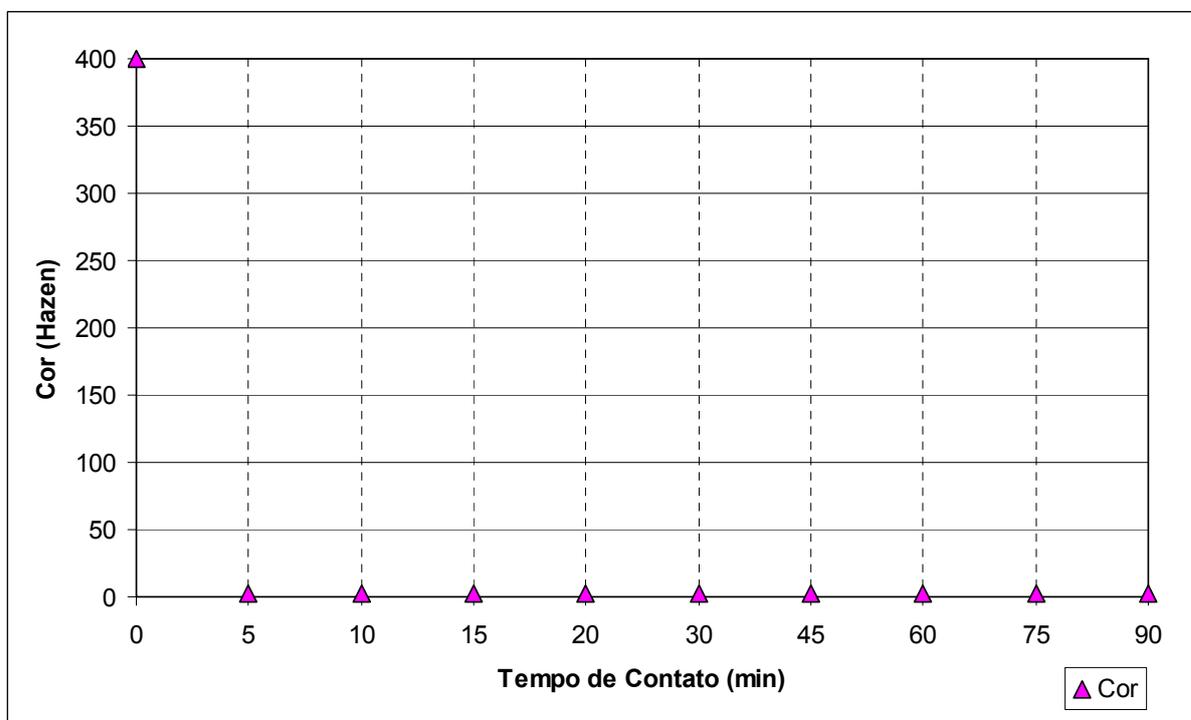


FIGURA 4.2 – VARIAÇÃO DA COR DURANTE A DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONTATO DO CARVÃO ATIVADO



A Figura 4.3 apresenta os resultados para CT, COT, CI e turbidez versus o tempo de contato. Nesta figura nota-se uma queda muito forte do carbono orgânico

total que influencia na queda do carbono total, mesmo o carbono inorgânico tendo um ligeiro aumento. Pode-se notar que a turbidez também tem queda acentuada até os primeiros cinco minutos, ficando estabilizada após este período. A Figura 4.4 mostra que o pH não sofreu variação significativa durante o teste.

FIGURA 4.3 – VARIAÇÃO DO CT, COT, CI E TURBIDEZ DURANTE A DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONTATO DO CARVÃO ATIVADO

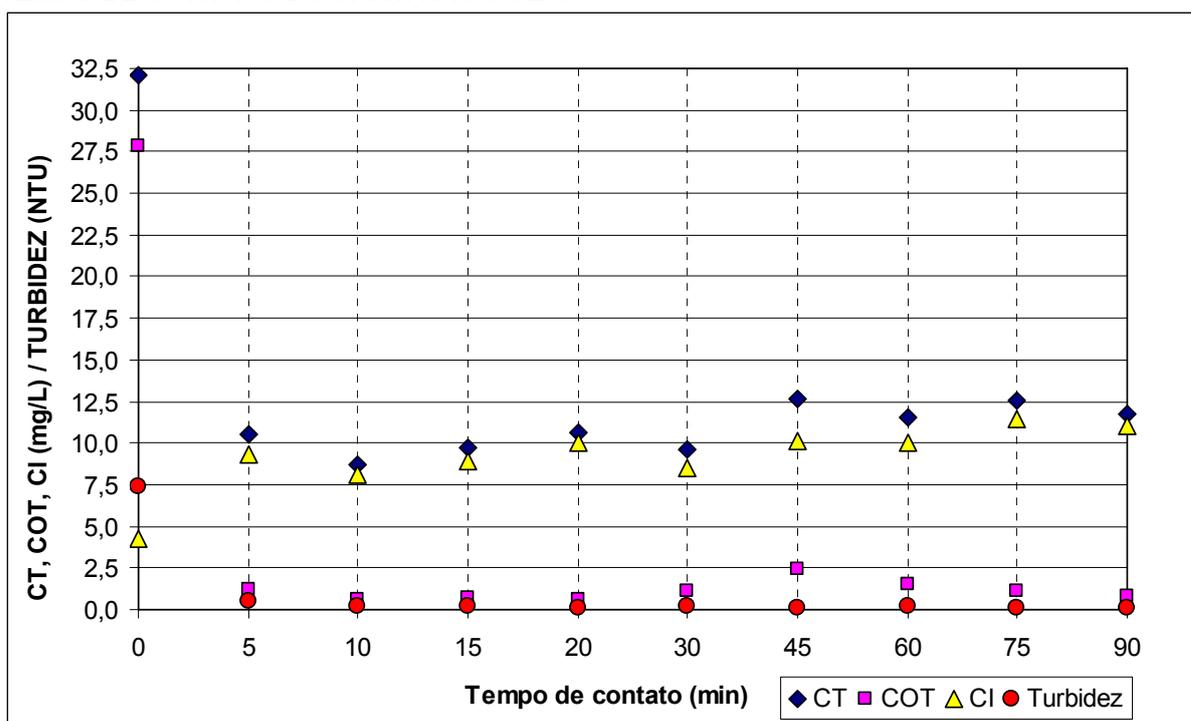
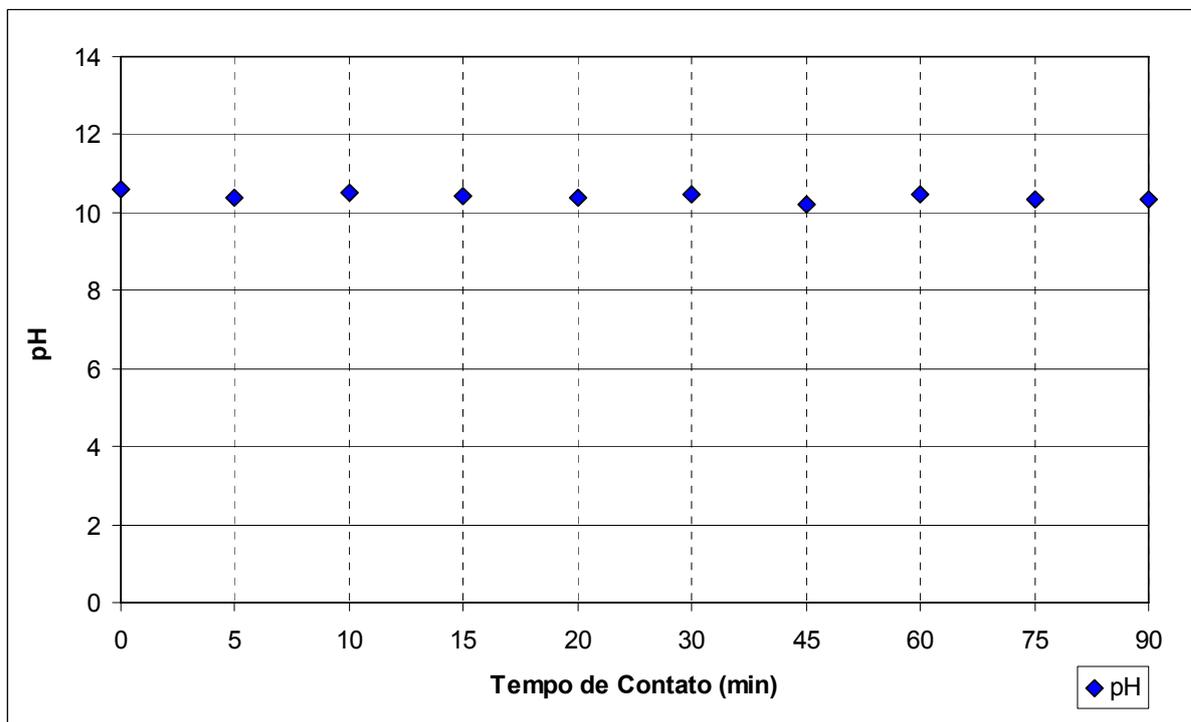


FIGURA 4.4 – VARIAÇÃO DO PH DURANTE A DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONTATO DO CARVÃO ATIVADO



O Quadro 4.3 relaciona os valores obtidos com a técnica recomendada para determinar a taxa de adsorção do carvão, que estabelece a proporção entre a quantidade em peso do carvão com a eficiência na remoção de DQO, CT, COT, CI e turbidez.

QUADRO 4.3 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO APÓS CONTATO COM CARVÃO ATIVADO DURANTE A DETERMINAÇÃO DA TAXA DE ADSORÇÃO

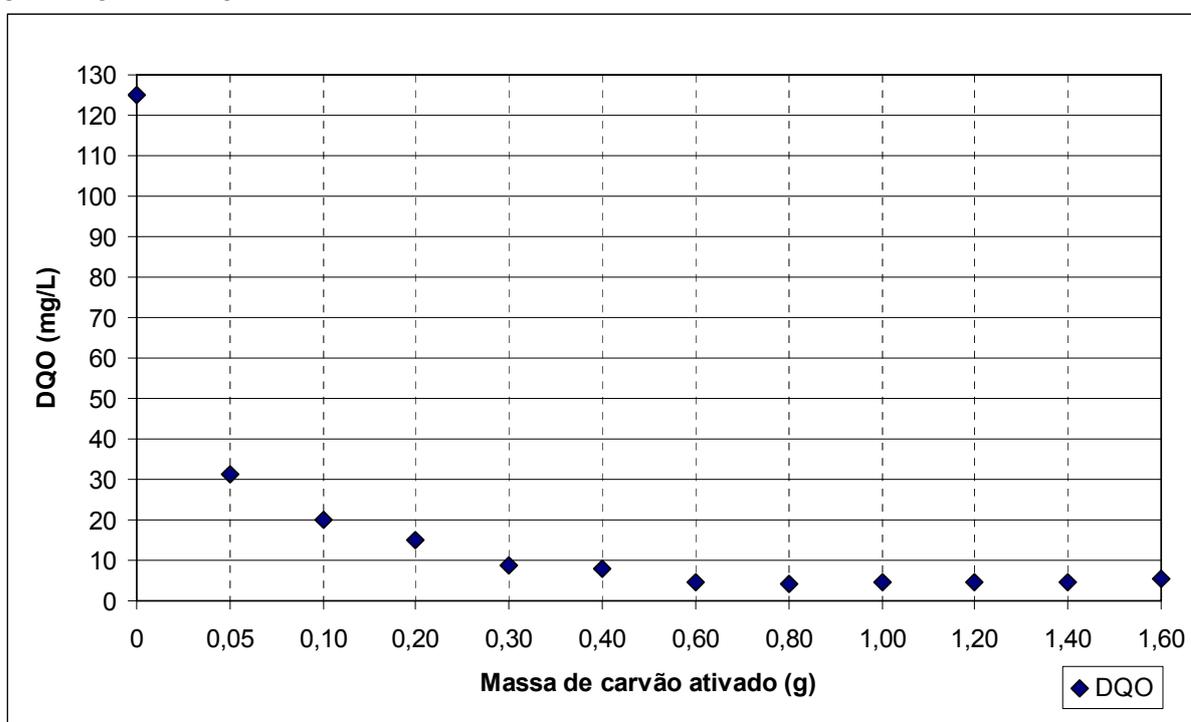
Massa de Carvão (g)	DQO (mg/L)	CT (mg/L)	COT (mg/L)	CI (mg/L)	Turbidez (NTU)	pH	Temperatura durante as análises (°C)
0,00	124,99	34,14	28,85	5,32	7,38	9,24	22,10
0,05	31,08	18,03	11,09	6,94	0,74	9,05	22,20
0,10	19,92	15,35	8,67	6,68	0,75	9,28	22,60
0,20	15,14	12,46	5,64	6,82	0,87	9,28	23,00
0,30	8,67	11,75	4,79	6,96	0,58	9,32	22,50
0,40	7,97	10,30	3,30	7,00	0,71	9,35	22,70
0,60	4,78	9,38	2,51	6,87	0,71	9,43	22,70
0,80	3,98	9,66	2,20	7,46	0,41	9,47	23,50
1,00	4,76	8,91	1,46	7,45	0,33	9,50	23,20
1,20	4,78	9,59	1,42	8,17	0,20	9,53	23,70
1,40	4,78	9,13	1,00	8,13	0,22	9,54	24,00
1,60	5,57	9,07	1,19	7,88	0,19	9,58	24,00

Observação: Os testes de adsorção foram realizados a uma temperatura do efluente de 22°C

A Figura 4.5 apresenta a queda da concentração da DQO versus a variação da massa de carvão aplicada aos 400 mL da amostra de efluente. Percebe-se que

com uma massa de 0,60g de carvão ativado a DQO se estabiliza com uma remoção de 99,96% e pesos maiores praticamente não alteram esta eficiência. A Figura 4.6 mostra a variação do CT, COT, CI e turbidez pela mesma massa e volume de amostra. A tendência de redução destes parâmetros se confirma da mesma forma que durante o teste de determinação do tempo de contato. Para uma massa de 1,40g de carvão ativado o COT se estabiliza com remoção de 99,97% enquanto que para a turbidez é necessária massa de 1,20g, apesar de que com uma massa de 0,05g existe uma remoção de 99,9% da turbidez.

FIGURA 4.5 – VARIAÇÃO DA DQO DURANTE A DETERMINAÇÃO DA TAXA DE ADSORÇÃO DO CARVÃO ATIVADO



Da mesma forma que no teste determinação do tempo de contato, a Figura 4.7 mostra que o pH não sofreu variação significativa durante a determinação da taxa de adsorção.

FIGURA 4.6 – VARIAÇÃO DO CT, COT, CI E TURBIDEZ DURANTE A DETERMINAÇÃO DA TAXA DE ADSORÇÃO DO CARVÃO ATIVADO

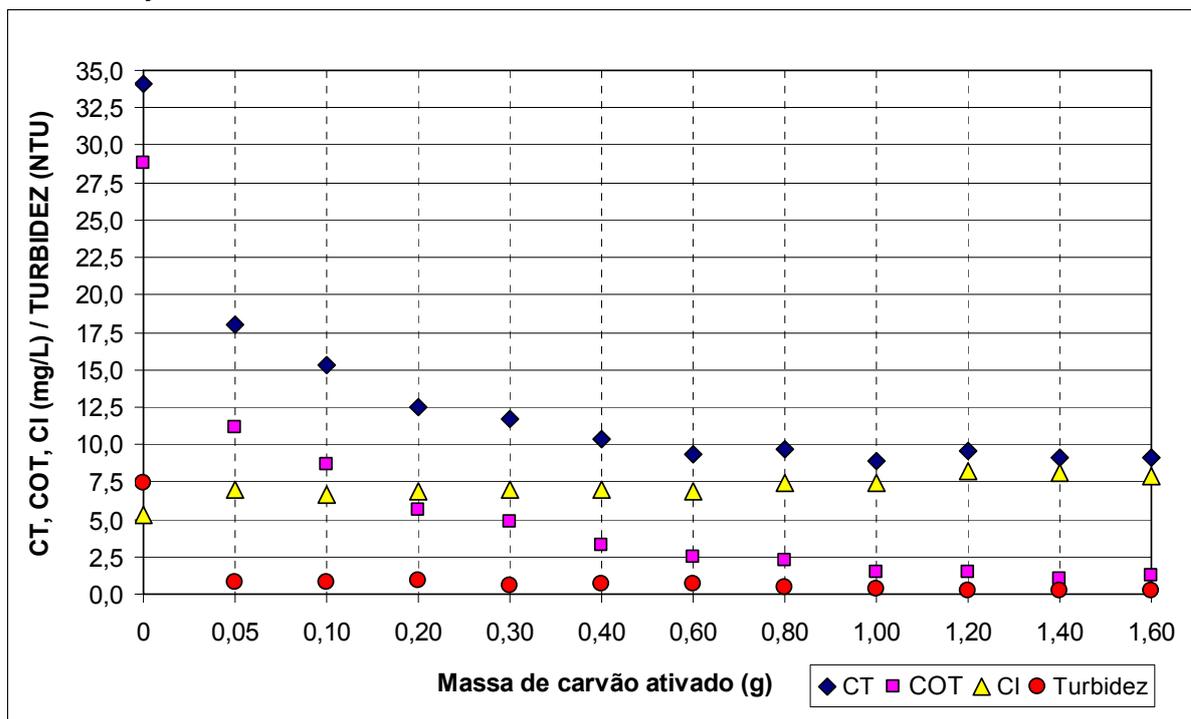
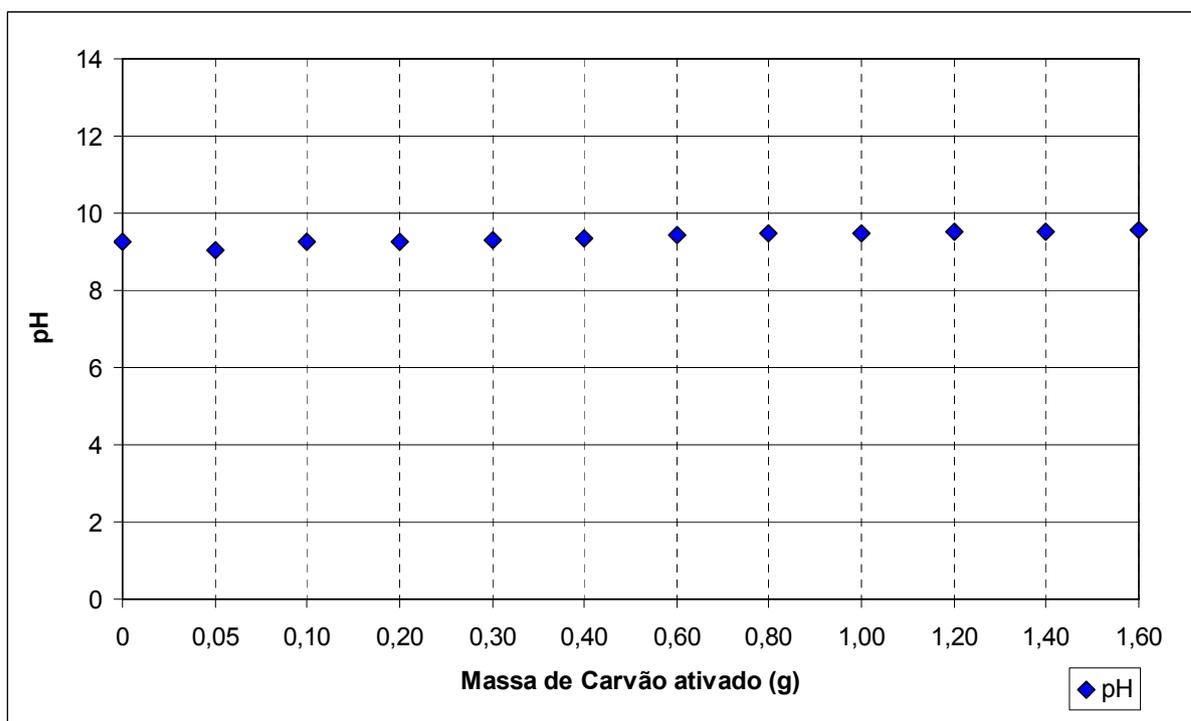


FIGURA 4.7 – VARIAÇÃO DO PH DURANTE A DETERMINAÇÃO DA TAXA DE ADSORÇÃO DO CARVÃO ATIVADO



Aplicando-se a Equação 3.1 e considerando a menor massa das que tiveram valores semelhantes em termos de concentração de DQO (0,60g), encontra-se o

resultado da taxa de adsorção do carvão ativado, cujo valor médio, para os resultados do Quadro 4.3 é de:

$$T. A. (\% \text{ peso})_{\text{DQO}} = \frac{0,12499(\text{g}) - 0,00478(\text{g})}{0,60(\text{g})} \times 100 = 20,03\%$$

de adsorção por grama de carvão ativado. Desta forma pode-se concluir que a capacidade de adsorção dos contaminantes do despejo pela coluna de carvão ocupará 20,03% da superfície de contato. O mesmo cálculo pode ser feito considerando os valores em termos de concentração de COT (1,40g) que após aplicar a mesma equação tem-se uma taxa de adsorção para o COT de:

$$T. A. (\% \text{ peso})_{\text{COT}} = \frac{0,02885 (\text{g}) - 0,001 (\text{g})}{1,40 (\text{g})} \times 100 = 1,99\%$$

por grama de carvão ativado.

Parâmetros como ST, SST, SDT e condutividade não foram analisados no momento do teste devido não serem prioridade naquele momento. Após os ensaios de batelada com o carvão, era esperado realizar um teste contínuo em coluna de carvão, porém devido dificuldades de infra-estrutura e equipamentos a segunda etapa do teste foi inviabilizada.

4.2.2. Oxidação via ozonização

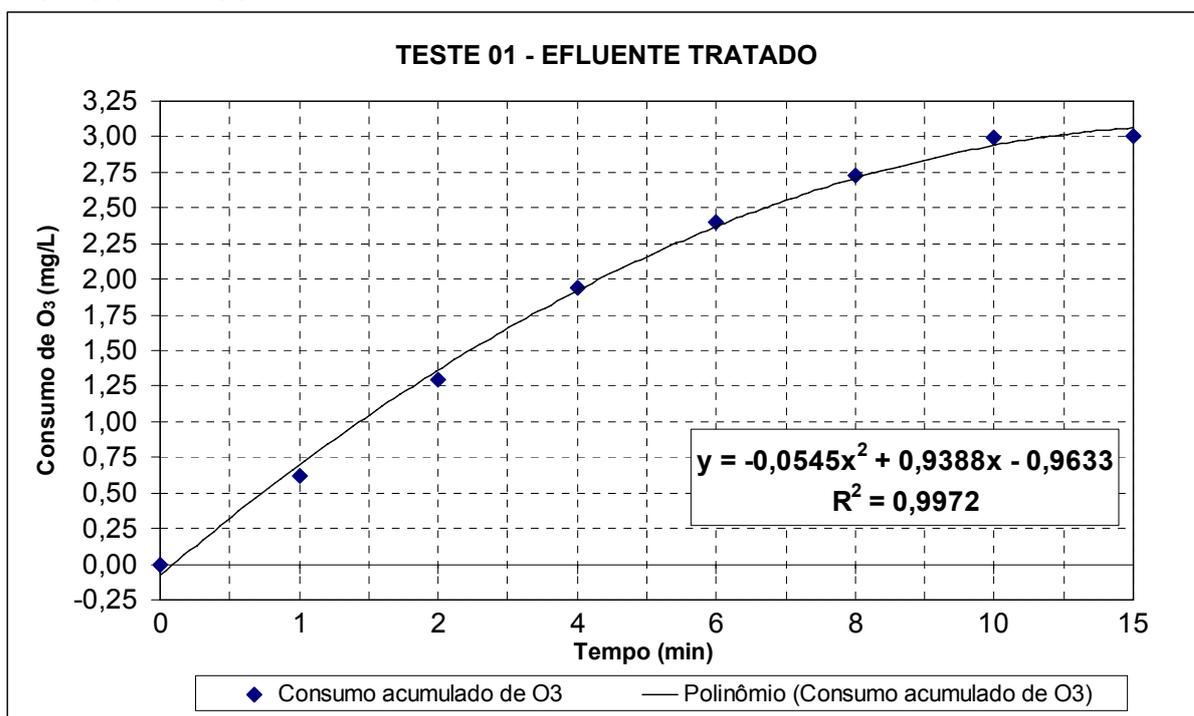
4.2.2.1. Resultados preliminares

Os resultados para o consumo de ozônio em cada coleta e seu consumo acumulado podem ser observados nos Quadro 4.4 para o efluente tratado e no Quadro 4.5 para o efluente tratado filtrado. As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam os pontos de consumo acumulado para o ozônio em relação ao tempo de tratamento para os dois testes. Nestas figuras também são apresentadas às curvas de tendência para o consumo nos dois testes.

QUADRO 4.4 – CONSUMO DE OZÔNIO PARA TESTE 01 – AMOSTRA TRATADA

Tempo (min)	% O ₃ Gerado	% O ₃ Off Gás	Consumo de O ₃ (mg/L)	Consumo Acumulado (mg/L)
0	1,030	1,030	0,000	0,00
1	1,030	0,5955	0,616	0,62
2	1,030	0,5767	0,675	1,29
4	1,030	0,6147	0,651	1,94
6	1,030	0,7510	0,461	2,40
8	1,030	0,8430	0,327	2,73
10	1,030	0,8911	0,258	2,99
15	1,030	0,9338	0,017	3,01

FIGURA 4.8 – CONSUMO ACUMULADO DE OZÔNIO EM RELAÇÃO AO TEMPO DO ENSAIO – TESTES 01 – AMOSTRA TRATADA

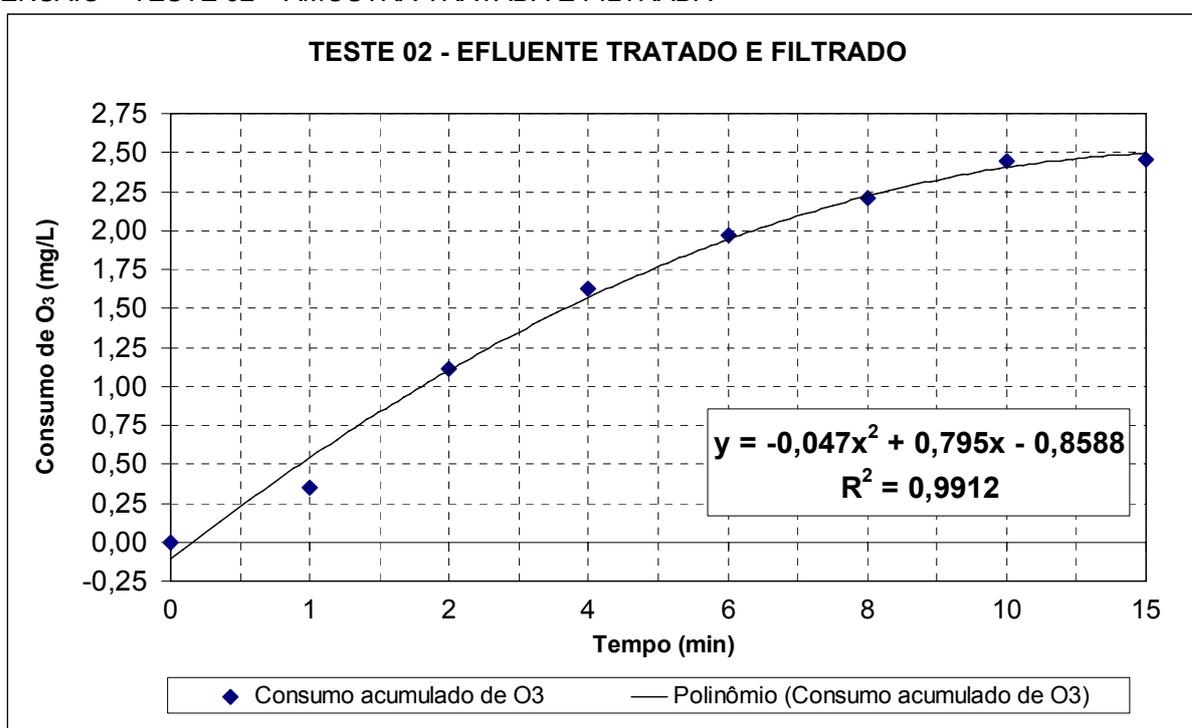


Nota-se nos gráficos (Figuras 4.8 e 4.9) que a capacidade de consumo de O₃ a partir de 10 minutos, tanto para o efluente tratado como para o tratado e filtrado, começa se extinguir. Esta característica também pode ser observada nas curvas de tendência dos gráficos, que começam a ficar horizontais, demonstrando que após 15 minutos não há mais consumo significativo de ozônio pelo efluente. Assim, pode-se afirmar que a escolha do tempo máximo de 15 minutos para o teste foi suficiente.

QUADRO 4.5 – CONSUMO DE OZÔNIO PARA TESTE 02 – AMOSTRA TRATADA E FILTRADA

Tempo (min)	% O ₃ Gerado	% O ₃ Off Gás	Consumo de O ₃ (mg/L)	Consumo Acumulado (mg/L)
0	1,000	1,000	0,000	0,00
1	1,000	0,7500	0,355	0,35
2	1,000	0,4888	0,761	1,12
4	1,000	0,6763	0,507	1,62
6	1,000	0,7924	0,343	1,97
8	1,000	0,8653	0,236	2,20
10	1,000	0,8699	0,242	2,44
15	1,000	0,9173	0,014	2,46

FIGURA 4.9 – CURVA DO CONSUMO ACUMULADO DE OZÔNIO EM RELAÇÃO AO TEMPO DO ENSAIO – TESTE 02 – AMOSTRA TRATADA E FILTRADA



4.2.2.2. Resultados dos testes

Os testes de oxidação via ozônio comprovaram a eficácia do método para desinfecção de efluentes contendo coliformes totais e fecais, como pode ser observado no Quadro 4.6. Para o teste 01 com tempo a partir de 2 minutos o CF reduziram ao não detectável e enquanto que para desinfecção total do efluente em termos de CT_M foram necessários 15 minutos. Para o teste 02 com efluente filtrado o tempo de 1 minuto foi o suficiente para reduzir o CF ao não detectável pela metodologia e para o CT_M a desinfecção completa ocorreu a partir dos 6 minutos.

Os resultados para o pH para o teste 01 e 02 também podem ser observados neste quadro. Neste caso, a ozonização do efluente reduziu o pH em praticamente meio ponto para os dois testes.

No quadro também pode ser observado que o consumo de ozônio pelo efluente tratado (teste 01) e tratado e filtrado (teste 02) se reduz a praticamente zero com tempo de contato de 15 minutos, comprovando que o tempo total escolhido para os testes, além de desinfetar o efluente, também oxidou toda a matéria orgânica possível para uma dose de 13,50 mg/L.mim de ozônio.

QUADRO 4.6 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DO EFLUENTE TRATADO E TRATADO + FILTRADO APÓS TRATAMENTO POR OZONIZAÇÃO

Tempo de Contato (min)	Parâmetros				
	Consumo Acumulado de O ₃ (mg/L)	Temperatura durante as análises (°C)	pH	Coliformes Totais (NMP/100mL)	Coliformes Fecais (NMP/100mL)
TESTE 01 – EFLUENTE TRATADO					
0,0 (Entrada)	0,00	22,00	9,01	1.700	10
1,0	0,62	22,00	8,93	180	2
2,0	1,29	22,00	8,81	200	< 1
4,0	1,94	22,00	8,72	2400	< 1
6,0	2,40	22,00	8,62	320	< 1
8,0	2,73	22,00	8,56	210	< 1
10,0	2,99	22,00	8,52	150	< 1
15,0	3,01	22,00	8,49	< 1	< 1
TESTE 02 – EFLUENTE TRATADO E FILTRADO					
0,0 (Entrada)	0,00	22,00	8,71	1.700	10
1,0	0,35	20,00	8,57	810	< 1
2,0	1,12	20,50	8,54	5	< 1
4,0	1,62	22,50	8,52	3	< 1
6,0	1,97	19,00	8,33	< 1	< 1
8,0	2,20	20,00	8,34	1	< 1
10,0	2,44	19,50	8,35	< 1	< 1
15,0	2,46	20,00	8,23	< 1	< 1

A Figura 4.10 mostra a queda no pH do efluente oxidado por ozônio. As duas séries apresentam uma tendência de queda sugerindo que, se o efluente fosse mantido em contato com o ozônio por mais tempo, o pH continuaria caindo.

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram os resultados para os ensaios de CT_M e CF respectivamente. Para os valores de coliformes totais, pode-se notar que na coleta do teste 01 com tempo de contato de 4 minutos houve um pico de 2400 NMP/100mL que é superior à contagem inicial. Isto indica algum tipo de contaminação durante a coleta da amostra, uma vez que o gráfico verifica a tendência de queda dos coliformes para os demais pontos. Para os resultados de CF a tendência de

desinfecção ocorreu normalmente e a partir de 2 minutos o efluente dos dois testes estavam desinfectados.

FIGURA 4.10 – VARIACÃO DO PH DURANTE OS TESTES COM OZONIZAÇÃO

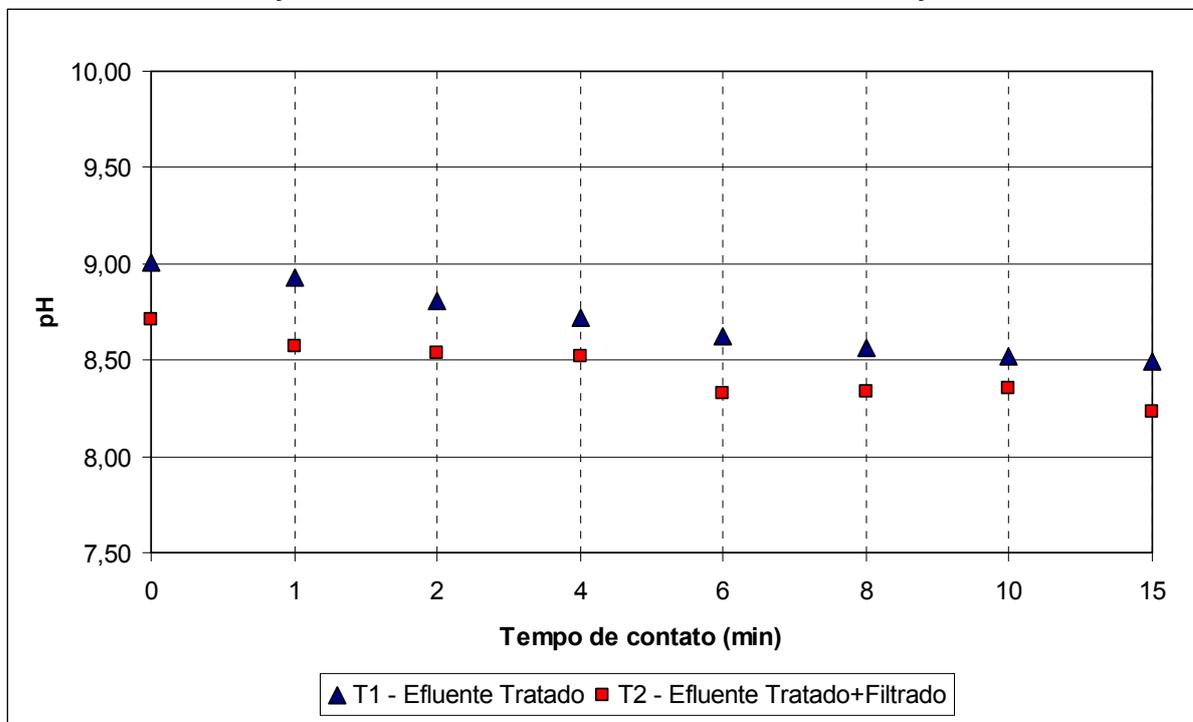


FIGURA 4.11 – VARIACÃO DE COLIFORMES TOTAIS DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO

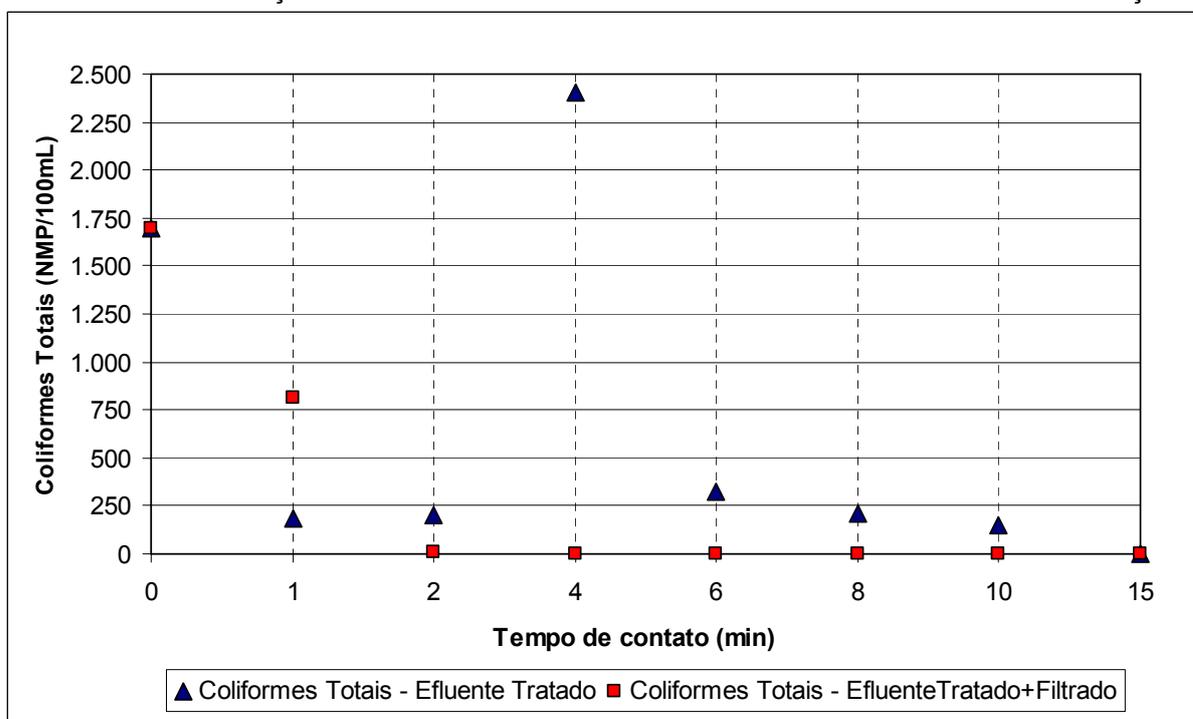
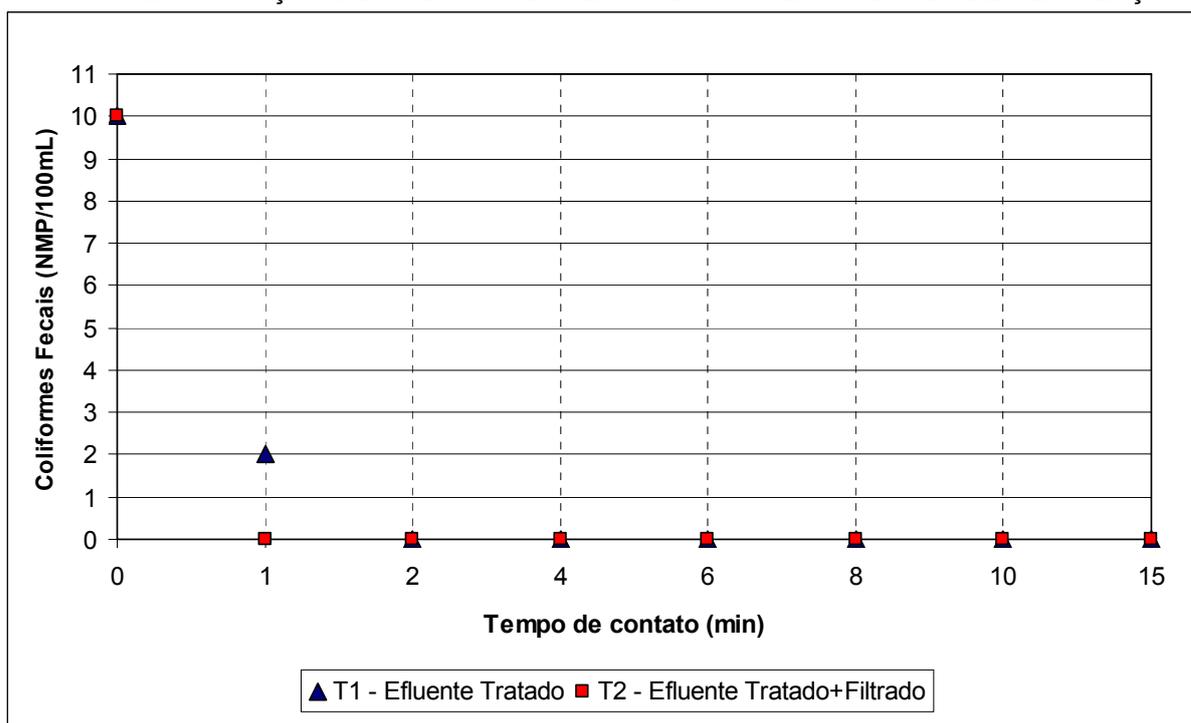


FIGURA 4.12 – VARIAÇÃO DE COLIFORMES FECAIS DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO



Os resultados para DQO, Cor, CT, COT e CI são apresentados no Quadro 4.7. Pode-se observar que no teste 01 ocorreu uma redução de 27,7% na DQO do tempo inicial zero em relação ao tempo de contato 1 minuto, situação que não ocorreu no teste 02. O motivo é devido o efluente tratado possuir matéria orgânica em suspensão a qual foi levada pelas bolhas de ozônio para o topo da coluna. Para o efluente filtrado esta situação não ocorreu devido à matéria em suspensão já ter sido retida no filtro. Esta situação manteve a DQO estabilizada até os 4 minutos de tempo de contato.

Outra análise que pode ser feita é que a melhor remoção de DQO no teste 01 ocorreu no tempo 1 e 4 minutos com 27,7% e no teste 02 com tempo 6 e 10 minutos com 27,4%. Porém estas remoções são inferiores ao simples processo de filtração (do efluente tratado na entrada) entre os dois testes que proporcionou 40,6% de eficiência na remoção.

O ozônio também foi efetivo na redução da cor. Tanto no teste 01 como no teste 02 as reduções foram significativas, obtendo para o tempo de 15 minutos uma eficiência de remoção de 73% e 74,5% respectivamente. Neste parâmetro, a simples filtração do efluente tratado na entrada também obteve boa eficiência de remoção com 70,4%.

QUADRO 4.7 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO E TRATADO + FILTRADO APÓS TRATAMENTO POR OZONIZAÇÃO

Tempo de Contato (min)	Parâmetros					
	Consumo Acumulado de O ₃ (mg/L)	DQO (mg/L)	Cor (Hazen)	CT (mg/L)	COT (mg/L)	Cl (mg/L)
TESTE 01 – EFLUENTE TRATADO						
0,0 (Entrada)	0,00	102,00	345	83,43	41,15	42,28
1,0	0,62	73,70	243	72,87	22,42	50,46
2,0	1,29	75,69	158	69,49	24,71	44,78
4,0	1,94	73,70	144	69,39	27,78	41,61
6,0	2,40	75,69	110	69,19	27,92	41,25
8,0	2,73	83,66	95	69,11	29,85	39,26
10,0	2,99	80,00	97	71,49	32,61	38,88
15,0	3,01	90,00	93	72,99	30,82	42,18
TESTE 02 – EFLUENTE TRATADO E FILTRADO						
0,0 (Entrada)	0,00	60,60	102	59,93	20,35	39,59
1,0	0,35	60,00	53	58,50	16,77	41,72
2,0	1,12	62,00	43	57,73	17,59	40,13
4,0	1,62	60,00	44	56,37	16,44	39,94
6,0	1,97	44,00	36	56,27	17,03	39,24
8,0	2,20	50,00	33	55,95	17,67	38,29
10,0	2,44	44,00	31	56,50	18,16	38,34
15,0	2,46	46,00	26	56,34	16,88	39,46

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram a variação da DQO e da cor durante os dois testes com ozônio.

FIGURA 4.13 – VARIAÇÃO DA DQO DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO

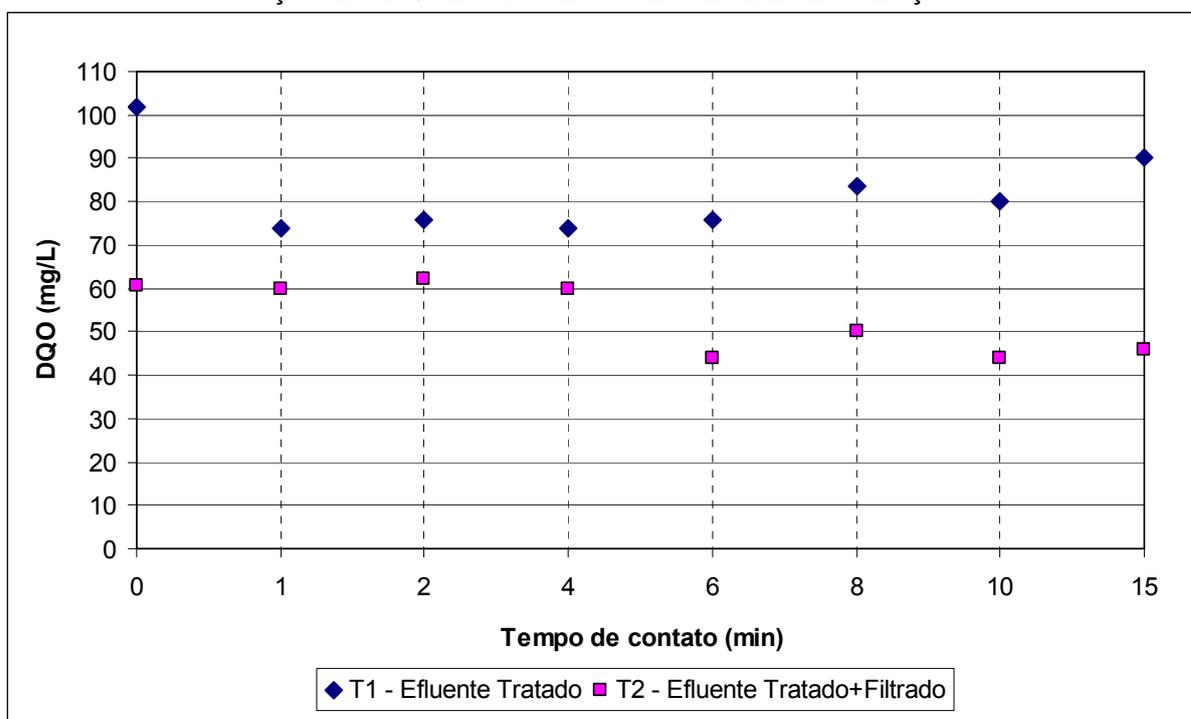
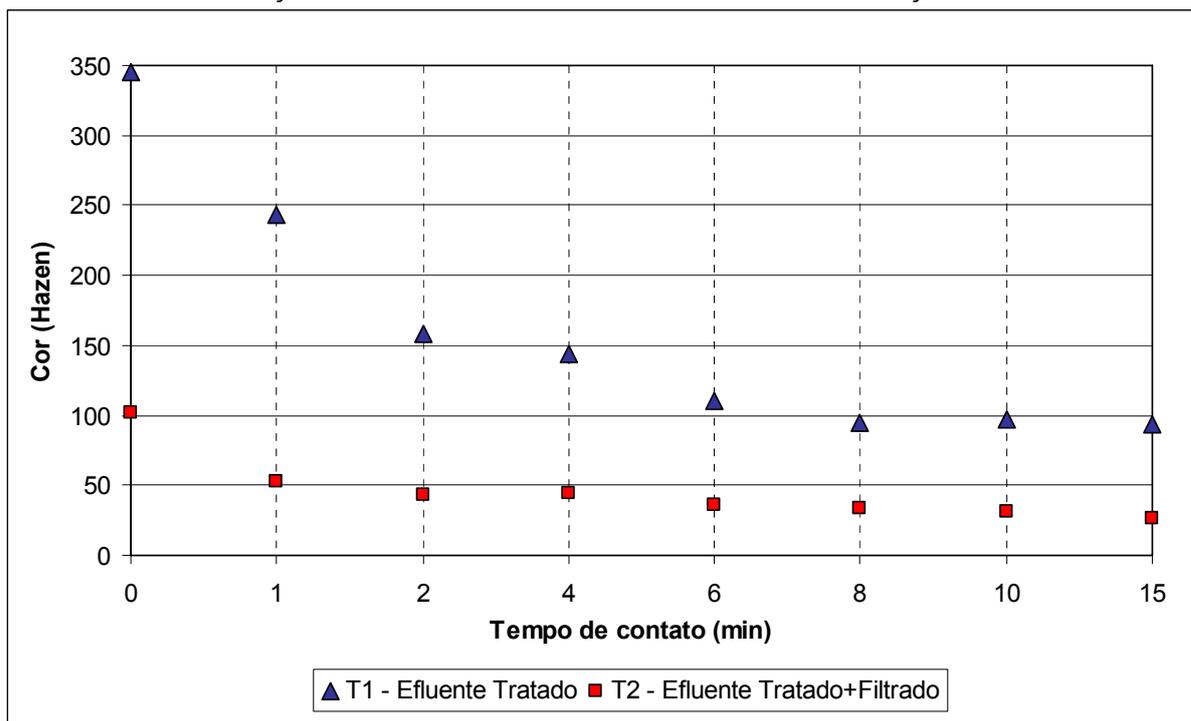


FIGURA 4.14 – VARIAÇÃO DA COR DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO



No caso dos parâmetros CT, COT e CI o ozônio foi pouco efetivo em termos de remoção. Para o COT, os resultados acabaram tendo variações durante o teste 01, porém, com 15 minutos de contato, a remoção final foi de apenas 25,1% e para o teste 02 de 17%. A ozonização não se mostrou eficiente para o parâmetro CI fazendo ainda elevar sua concentração os primeiros três minutos de contato. Ao término dos testes sua concentração final foi a mesma do início. Para o CT a redução acabou acontecendo em decorrência dos resultados do COT, que compõe este parâmetro. A remoção para os 15 minutos de tempo de contato ficou em 12,5% e 6% para os testes 01 e 02 respectivamente.

As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 mostram a variação do CT, COT e CI durante os dois testes de oxidação com ozônio.

FIGURA 4.15 – VARIAÇÃO DO CARBONO TOTAL DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO

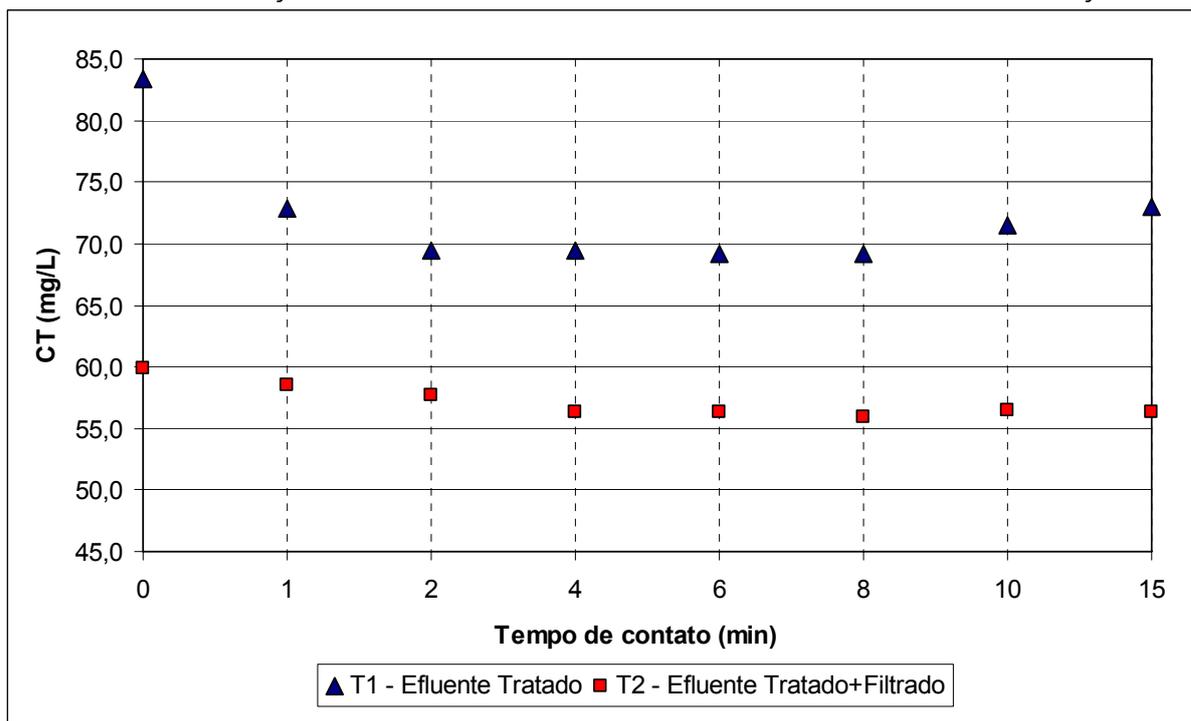


FIGURA 4.16 – VARIAÇÃO DO CARBONO ORGÂNICO DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO

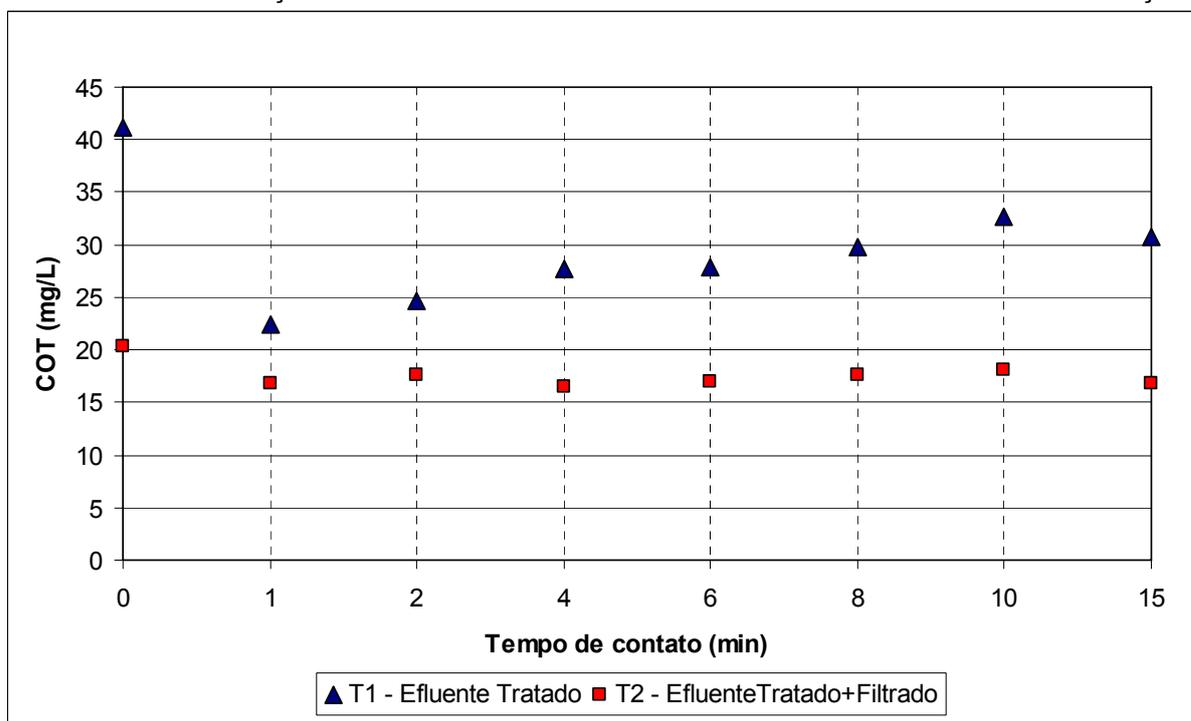
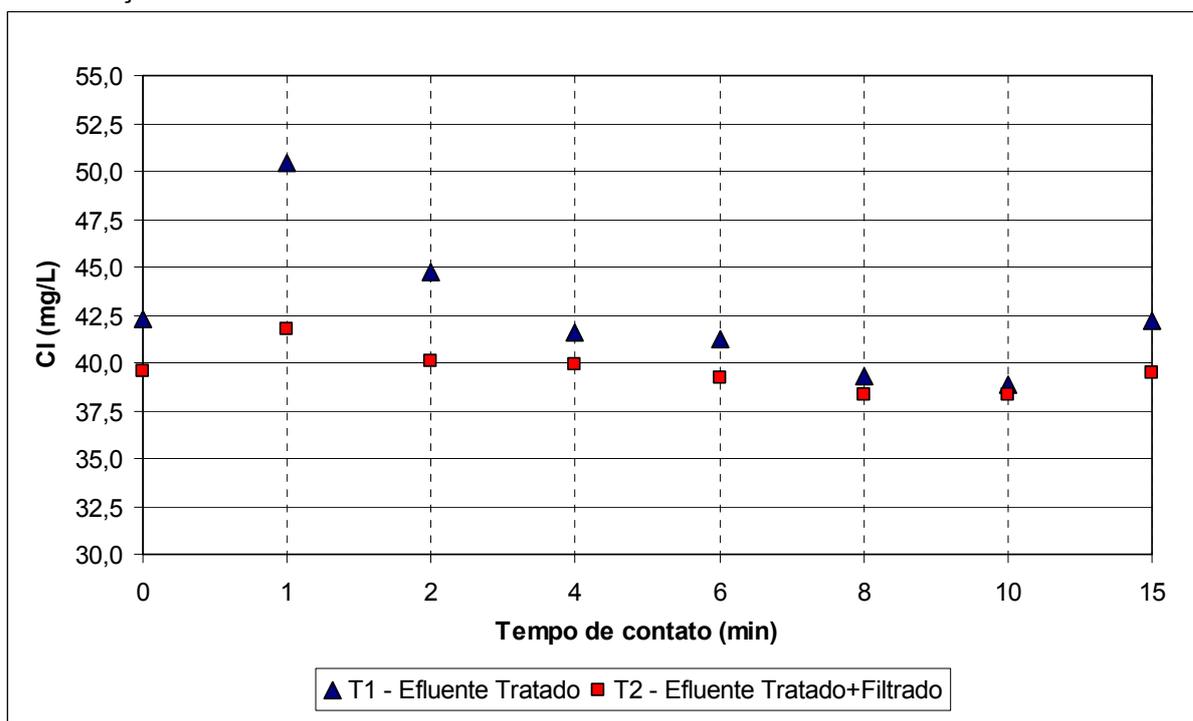


FIGURA 4.17 – VARIAÇÃO DO CARBONO INORGÂNICO DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO



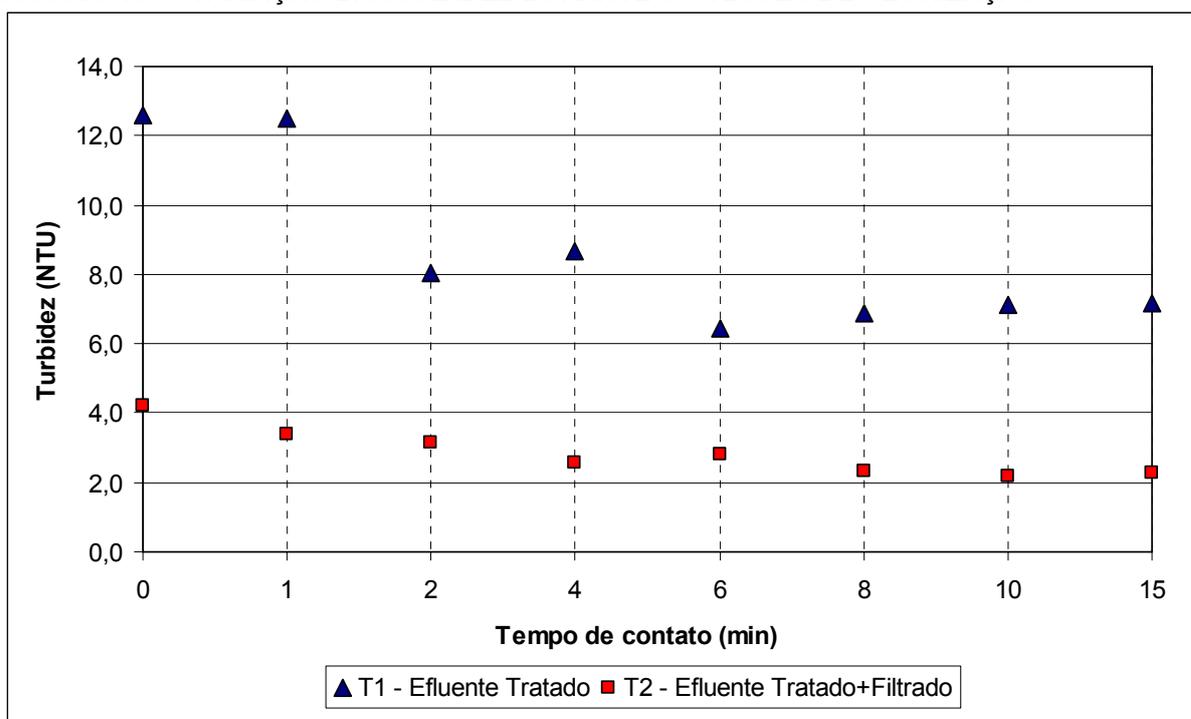
O estudo com ozônio também analisou o comportamento da turbidez, ST, SST e SDT. Os resultados para estes parâmetros são apresentados no Quadro 4.8. No teste 01 e 02 o ozônio obteve eficiência satisfatória na remoção da turbidez. Os melhores resultados foram alcançados com 6 minutos e remoção de 48,7% para o teste 01 e com 10 minutos e remoção de 48,2% para o teste 02. Entretanto, como ocorreu com a DQO, as remoções destes dois testes via ozonização também são inferiores ao processo de filtração do efluente tratado que proporcionou 66,6% de eficiência na remoção.

QUADRO 4.8 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO E TRATADO + FILTRADO APÓS TRATAMENTO POR OZONIZAÇÃO

Tempo de Contato (min)	Parâmetros				
	Consumo Acumulado de O ₃ (mg/L)	Turbidez (NTU)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)
TESTE 01 – EFLUENTE TRATADO					
0,0 (Entrada)	0,00	12,60	1.380	21	1.359
1,0	0,62	12,49	1.480	26	1.454
2,0	1,29	8,06	1.440	22	1.418
4,0	1,94	8,67	1.414	27	1.387
6,0	2,40	6,46	1.415	18	1.397
8,0	2,73	6,89	1.390	20	1.370
10,0	2,99	7,10	1.393	27	1.366
15,0	3,01	7,18	1.454	19	1.435
TESTE 02 – EFLUENTE TRATADO E FILTRADO					
0,0 (Entrada)	0,00	4,21	1.369	13	1.356
1,0	0,35	3,40	1.364	5	1.359
2,0	1,12	3,15	1.381	9	1.372
4,0	1,62	2,56	1.334	12	1.322
6,0	1,97	2,81	1.375	15	1.360
8,0	2,20	2,32	1.381	8	1.373
10,0	2,44	2,18	1.480	6	1.474
15,0	2,46	2,29	1.392	7	1.385

A Figura 4.18 mostra a variação da turbidez durante os dois testes de oxidação com ozônio.

FIGURA 4.18 – VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO



Para o trio de sólidos (ST, SDT e SST) os testes com ozônio também foram pouco efetivos em termos de remoção. Os resultados dos SST obtiveram variações consideráveis durante os dois testes, sendo o teste 01 com a maioria dos resultados acima do valor inicial e o teste 02 com apenas um resultado acima do valor de entrada. A remoção de SST com o tempo final de 15 minutos de contato, foi de apenas 9,5% para o teste 01 e de 46% e para o teste 02. No caso dos SDT a ozonização se mostrou prejudicial como ferramenta de remoção, pois elevou a concentração de todos os tempos de contato nos dois testes, com exceção do tempo de 4 minutos do teste 02. Por consequência disso, os ST tiveram praticamente a mesma variação em decorrência dos resultados do SDT, que representa quase que a totalidade deste parâmetro. Apenas nos tempos 1 e 4 minutos do teste 02, os ST obtiveram uma leve remoção em relação ao efluente de entrada.

As Figuras 4.19 e 4.20 mostram a amplitude da variação dos ST, SDT e SST durante os dois testes de oxidação com ozônio.

FIGURA 4.19 – VARIAÇÃO DOS SÓLIDOS TOTAIS E DISSOLVIDOS DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO

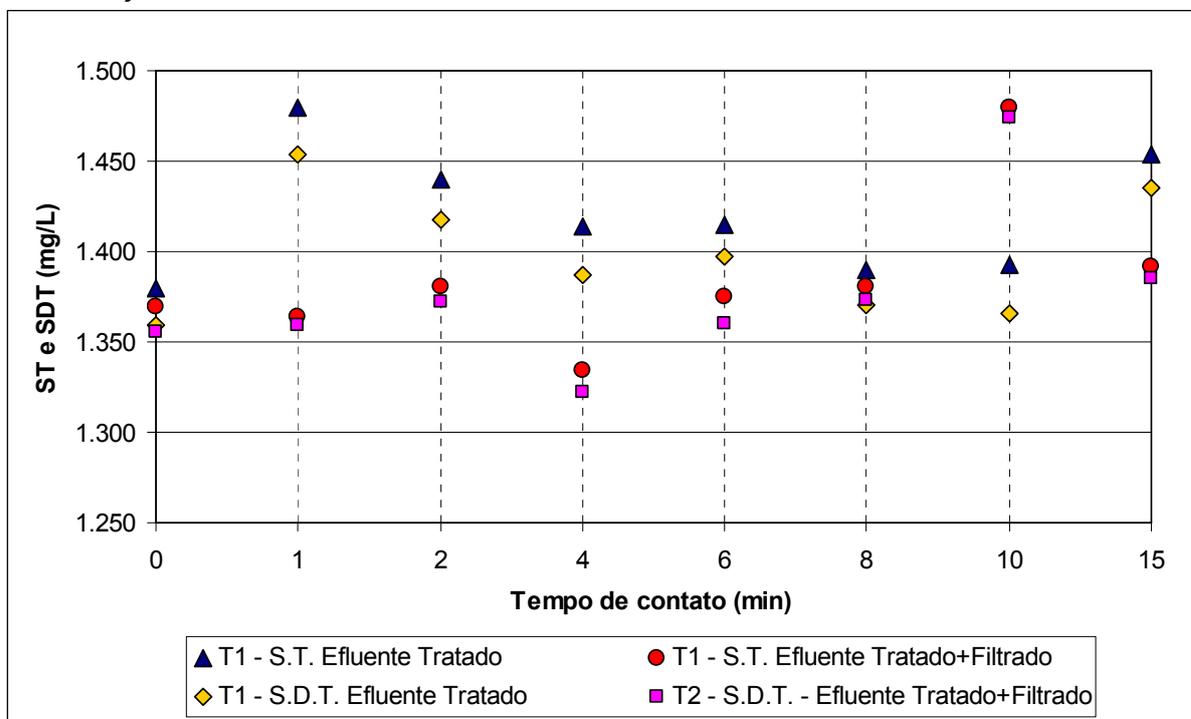
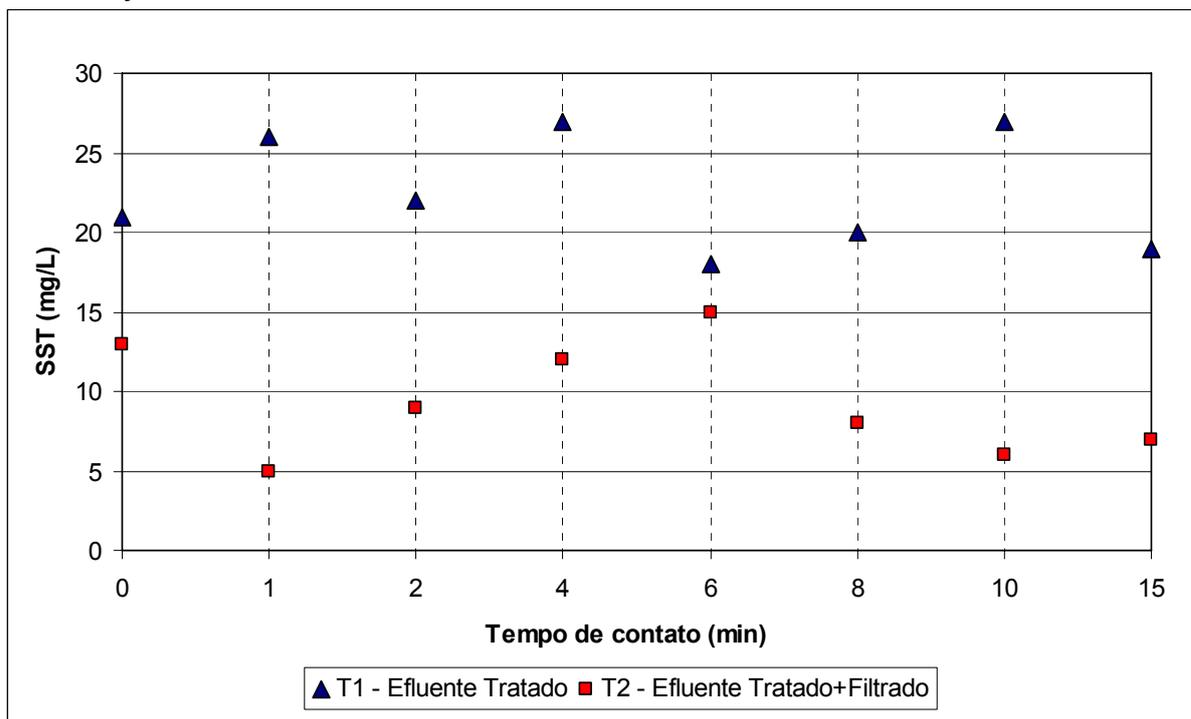


FIGURA 4.20 – VARIAÇÃO DOS SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS DURANTE OS TESTES DE OZONIZAÇÃO



4.2.3. Oxidação via dióxido de cloro

4.2.3.1. Cálculo do CT_D

Após os **testes de demanda** de ClO_2 , detalhado no item 3.2.2.3.1, a dose de 5 ppm permaneceu dentro da faixa de residual de ClO_2 recomendada (entre 0,1 e 0,8 ppm) e no tempo de 60 minutos obteve-se a estabilidade deste residual como pode ser observado no Quadro 4.9 e Figura 4.21. Então, aplicando a Equação 3.3 chega-se no valor de CT_D , conforme segue:

$$CT_D = \text{Concentração (mg/L)} \times \text{tempo (min)}$$

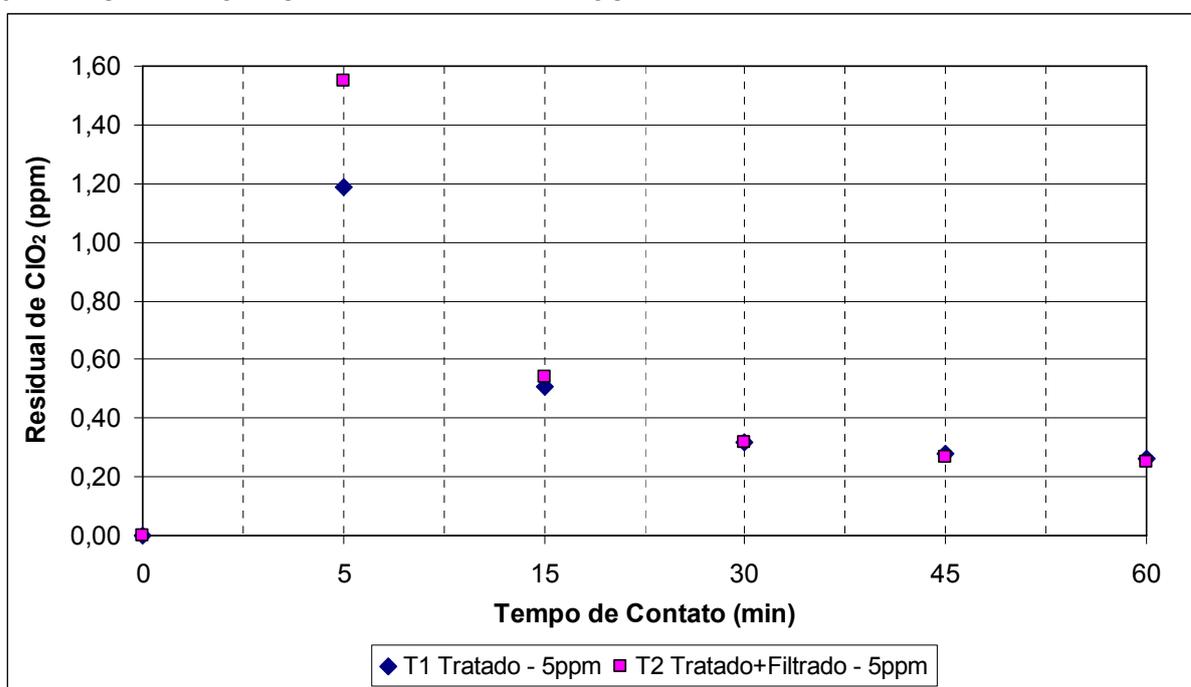
$$CT_D = 5 \text{ mg/L} \times 60 \text{ min}$$

$$CT_D = \mathbf{300 \text{ mg.min/L}}$$

QUADRO 4.9 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DIÓXIDO DE CLORO DURANTE TESTE DE DEMANDA.

Concentração de dióxido de cloro aplicado (ppm)	Tempo de contato (min)										
	0	5		15		30		45		60	
	Residual (ppm)	Residual (ppm)	Consumo (ppm)	Residual (ppm)	Consumo (ppm)	Residual (ppm)	Consumo (ppm)	Residual (ppm)	Consumo (ppm)	Residual (ppm)	Consumo (ppm)
T1 – EFLUENTE TRATADO											
5 ppm	0	1,19	3,81	0,51	4,49	0,32	4,68	0,28	4,72	0,26	4,74
T2 – EFLUENTE TRATADO E FILTRADO											
5 ppm	0	1,55	3,45	0,54	4,46	0,32	4,68	0,27	4,73	0,25	4,75

FIGURA 4.21 – PERFIS DO RESIDUAL DE DIÓXIDO DE CLORO PARA CONCENTRAÇÕES DE 5PPM DURANTE O TESTE DE DEMANDA – AMOSTRA TRATADA E TRATADA+FILTRADA



4.2.3.2. Resultados dos testes

Finalizados os testes de bancada, avaliou-se, após 1 hora, a concentração residual de dióxido de cloro nos seis jarros, sendo os três primeiros com efluente tratado e três finais com efluente tratado e filtrado. No jarro 1 o residual foi de 0,23 ppm, no jarro 2 foi de 0,27 ppm e o jarro 3 apresentou 0,24 ppm. Para o jarro 4 o residual foi de 0,26 ppm, o jarro 5 apresentou 0,25 ppm e, finalmente o jarro 6 tinha concentração de 0,21 ppm. Fazendo-se a média dos três jarros contendo efluente tratado o residual de ClO_2 foi de 0,25 ppm e o para o efluente tratado e filtrado o

residual ficou em 0,24 ppm. O Quadro 4.10 mostra os resultados para o residual de ClO_2 , pH e coliformes totais e fecais após os testes de oxidação com ClO_2 .

Após os testes, observou-se que o pH, tanto para o efluente tratado como para o filtrado, sofreu redução de aproximadamente 0,5 ponto. No caso dos coliformes totais e fecais, o ClO_2 confirmou sua capacidade de desinfecção e chegando ao limite do detectável pela metodologia obtendo remoção de 100% para os dois parâmetros tanto no teste 01 como no teste 02.

Para obter maior segurança nos resultados dos CT_M e CF, seria possível ainda aplicar mais 0,5 ppm de ClO_2 no efluente, uma vez que o residual de ClO_2 manteve-se em aproximadamente 0,25 ppm e somado aos 0,5 ppm adicionais ainda estariam abaixo de 0,8 ppm, máximo recomendado pela US EPA (1994).

QUADRO 4.10 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DO EFLUENTE TRATADO E TRATADO + FILTRADO APÓS APLICAÇÃO DE DIÓXIDO DE CLORO

Concentração de dióxido de cloro aplicado (ppm)	Parâmetros				
	Residual de ClO_2 após 60 min (ppm)	Temperatura durante as análises ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Coliformes Totais (NMP/100mL)	Coliformes Fecais (NMP/100mL)
TESTE 01 – EFLUENTE TRATADO					
0 ppm (Tratado)	0,00	21,50	8,14	3.100	74
5 ppm	0,25	21,50	7,56	< 1,8	< 1,8
TESTE 02 – EFLUENTE TRATADO E FILTRADO					
0 ppm (Filtrado)	0,00	21,50	8,00	1.600	7,8
5 ppm	0,24	21,50	7,61	< 1,8	< 1,8

No caso da DBO, o ClO_2 obteve uma remoção satisfatória para os dois testes. No teste com efluente tratado (01) oxidou 55,8% da matéria orgânica biodegradável enquanto que no teste com efluente filtrado (02) o rendimento foi levemente melhor, com 59,3% de remoção. Vale acrescentar que a simples filtração entre o teste 01 e 02 reduziu o parâmetro em 37,9%.

Na remoção da DQO, especificamente para o efluente em questão, o ClO_2 não obteve desempenho satisfatório. Removeu a matéria orgânica não biodegradável em 17,6% e 12,9% nos testes 01 e 02 respectivamente. Os resultados de CAMARGO (2004), com dosagem de 2,0mg/L e 30 minutos de tempo de contato, obtiveram uma melhor remoção da DQO, na ordem de 25,6%, porém o efluente usado era esgoto sanitário.

Para o parâmetro cor, o ClO_2 atuou de forma eficiente. Removeu a cor aparente em 86,7% para o teste com efluente tratado e 75% para o efluente filtrado.

Cabe aqui ressaltar que a remoção por filtração em filtro de polipropileno de 5 µm (efluente inicial do teste 02) também proporcionou boa remoção de cor, da ordem de 46,7% em relação ao efluente tratado do teste 01.

No caso do CT, COT e CI, o ClO₂ não obteve resultados efetivos. No teste 01, após 1 hora de tempo de contato, houve um aumento de 13,3% na concentração de COT em relação ao início do teste. Isto anulou a pequena redução do CI (Quadro 4.11). Esta situação elevou o parâmetro CT em relação ao valor inicial, que é a composição entre os dois anteriores. Já, no teste 02, a tendência de aumento dos parâmetros após o tratamento não ocorreu. Houve uma redução de 4,4% no COT e 10,1% do CI, impactando em uma redução de 8% no carbono total.

O Quadro 4.11 mostra os resultados para o DBO, DQO, Cor, CT, COT e CI após os testes de oxidação com ClO₂.

QUADRO 4.11 – VARIÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO E TRATADO + FILTRADO APÓS APLICAÇÃO DE DIÓXIDO DE CLORO

Concentração de dióxido de cloro aplicado (ppm)	Parâmetros					
	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Cor (Hazen)	CT (mg/L)	COT (mg/L)	CI (mg/L)
TESTE 01 – EFLUENTE TRATADO						
0 ppm (Tratado)	48,39	162,08	300	122,86	42,39	80,47
5 ppm	21,38	133,60	40	126,50	48,04	78,47
TESTE 02 – EFLUENTE TRATADO E FILTRADO						
0 ppm (Filtrado)	30,06	142,82	160	126,10	46,39	79,71
5 ppm	12,22	124,37	40	116,00	44,34	71,63

O Quadro 4.12 apresenta os resultados para a condutividade, turbidez, ST, SST e SDT obtidos após os testes de oxidação com ClO₂. Para estes parâmetros, o tratamento não mostrou efetividade de remoção, com exceção dos SST. A condutividade teve um leve aumento no teste 01 (1,5%) e no teste 02 pode permanecer estável, podendo dizer que variou dentro da faixa de erro de leitura do equipamento. No caso da turbidez, houve uma inexpressiva queda de menos de 1% nos dois testes, também ficando próximo da faixa de erro de leitura. Os ST tiveram um leve aumento no teste 01 e uma leve queda no teste 02, influenciados pelos valores dos SDT. Esta variação, ora crescente, ora decrescente para os ST e SDT pode ter ocorrido pela mesma situação comentada para os parâmetros CT e COT no teste 01.

O único parâmetro do Quadro 4.12 a sofrer queda considerável em sua concentração foram os SST. No teste 01 houve queda de 25,6% e no teste 02 queda de 40,5%. Estes percentuais são reflexos da oxidação de parte da matéria orgânica em suspensão do efluente.

QUADRO 4.12 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO E TRATADO + FILTRADO APÓS APLICAÇÃO DE DIÓXIDO DE CLORO

Concentração de dióxido de cloro aplicado (ppm)	Parâmetros				
	Condutividade (μ .S/cm)	Turbidez (NTU)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)
TESTE 01 – EFLUENTE TRATADO					
0 ppm (Tratado)	1.045	7,02	1.642	39	1.603
5 ppm	1.061	6,95	1.666	29	1.637
TESTE 02 – EFLUENTE TRATADO E FILTRADO					
0 ppm (Filtrado)	1.050	5,79	1.716	42	1.674
5 ppm	1.052	5,76	1.675	25	1.650

4.2.4. Osmose reversa

Após realizados os procedimentos de limpeza e medição da vazão de projeto, procedeu-se os testes contínuos. Durante estes testes foram coletadas amostras de três pontos: (1) após passagem pelo filtro de polipropileno; (2) do permeado, e; (3) do rejeito, porém este somente no final de cada teste. O Quadro 4.13 mostra os resultados para o pH, condutividade, CT_M e CF obtidos durante os testes de filtração com osmose reversa.

Observa-se que o pH, sofreu pouca influência após passagem pelo filtro de polipropileno, porém, no permeado, este reduziu em média 19,8% para o teste 01 e 17,6% para o teste 02. No rejeito a queda do pH foi em torno de 0,5 pontos ao final dos dois testes. A condutividade também se manteve constante para as amostras coletadas no filtro de polipropileno. No entanto, tiveram uma queda drástica quando analisado as amostras do permeado e do rejeito. Para o teste 01 a remoção média de íons ficou em torno de 92,9% e para o teste 02 de 94,9%. As amostras de rejeito coletadas com 180 minutos obtiveram um aumento de 120,7% e 101,7% para os testes 01 e 02 respectivamente. Em termos de coliformes totais e fecais, a filtração com osmose reversa também se mostrou eficaz. O grupo coliformes foi analisado apenas para o permeado, principal objeto de estudo desta tecnologia. Neste caso, os resultados obtidos para CT_M foram de 100% de remoção no teste 01 como no teste 02, uma vez que foi atingido o limite de detecção da metodologia. Para o CF a

remoção obtida também chegou ao limite do detectável caracterizando ausência de crescimento nos testes 01 e 02. Estes resultados confirmam a capacidade da membrana em reter bactérias e sais dissolvidos.

QUADRO 4.13 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DO EFLUENTE FILTRADO TRATADO POR OSMOSE REVERSA

Tempo (min)	Parâmetros				
	Temperatura durante as análises (°C)	pH	Condutividade (µ.S/cm)	Coliformes Totais (NMP/100mL)	Coliformes Fecais (NMP/100mL)
TESTE 01 - AMOSTRA DO FILTRO POLIPROPILENO (FP)					
0 (Tratado)	15,00	8,73	1033	730.000	10
15	19,00	8,18	1038	N.A.	N.A.
30	19,00	8,28	1038	N.A.	N.A.
60	19,00	8,36	1038	N.A.	N.A.
90	19,00	8,37	1038	N.A.	N.A.
120	19,00	8,32	1038	N.A.	N.A.
180	19,00	8,31	1044	N.A.	N.A.
TESTE 01 - AMOSTRA PERMEADO OSMOSE REVERSA (FP+FCC+OR)					
0 (Tratado)	15,00	8,73	1033	730.000	10
15	18,00	6,55	74,7	<1	<1
30	18,00	7,55	70,5	<1	<1
60	18,00	7,03	70,2	<1	<1
90	18,00	6,96	70,2	<1	<1
120	18,00	7,46	79,4	<1	<1
180	18,00	6,47	71,8	<1	<1
TESTE 01 - AMOSTRA REJEITO OSMOSE REVERSA (FP+FCC+OR)					
180	19,00	8,22	2.280	N.A.	N.A.
TESTE 02 - AMOSTRA DO FILTRO POLIPROPILENO (FP)					
0 (Tratado)	19,00	8,81	1041	3.400	8,4
15	20,00	8,94	1043	N.A.	N.A.
30	20,00	8,94	1037	N.A.	N.A.
60	20,00	8,94	1029	N.A.	N.A.
90	20,00	8,92	1033	N.A.	N.A.
120	20,00	8,91	1033	N.A.	N.A.
180	20,00	8,88	1031	N.A.	N.A.
TESTE 02 - AMOSTRA PERMEADO OSMOSE REVERSA (FP+OR)					
0 (Tratado)	19,00	8,81	1041	3.400	8,4
15	20,00	7,11	42,4	<1,8	<1,8
30	20,00	6,97	42,2	<1,8	<1,8
60	20,00	6,95	47,5	<1,8	<1,8
90	20,00	7,11	51,7	<1,8	<1,8
120	20,00	8,20	69,9	<1,8	<1,8
180	20,00	7,23	62,6	<1,8	<1,8
TESTE 02 - AMOSTRA REJEITO OSMOSE REVERSA (FP+OR)					
180	20,00	8,21	2.100	N.A.	N.A.

N.A.: Não avaliado.

As Figuras 4.22 e 4.23 mostram a variação do pH e da condutividade durante os testes de filtração com o sistema de osmose reversa.

FIGURA 4.22 – VARIAÇÃO DO PH DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA

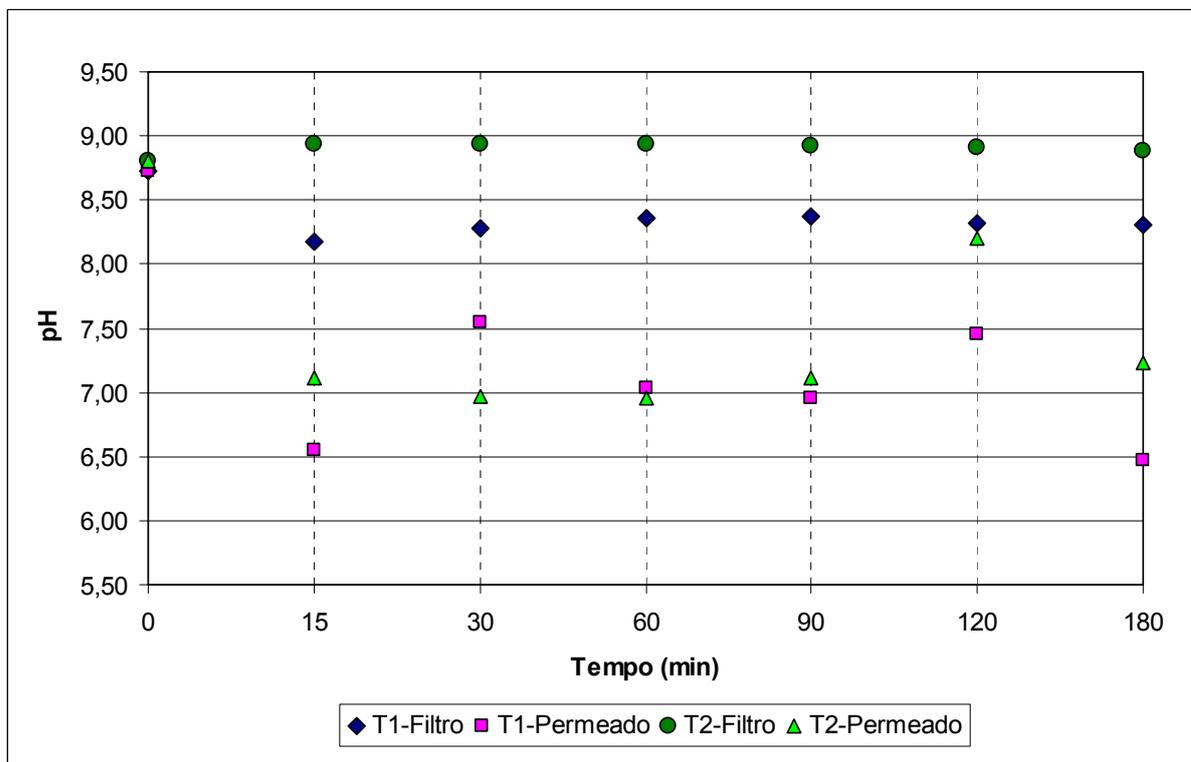
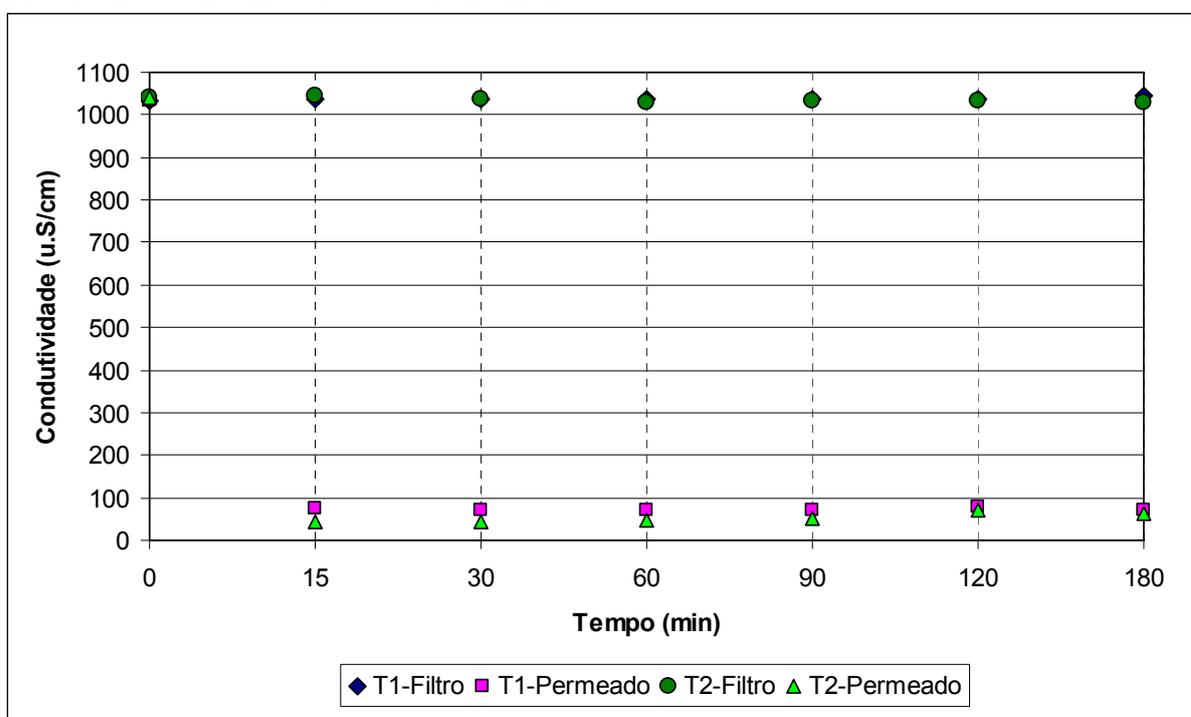


FIGURA 4.23 – VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA



As Figuras 4.24 e 4.25 mostram a variação dos Coliformes totais e fecais durante os testes de filtração com o sistema de osmose reversa.

FIGURA 4.24 – VARIÇÃO DOS COLIFORMES TOTAIS DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA

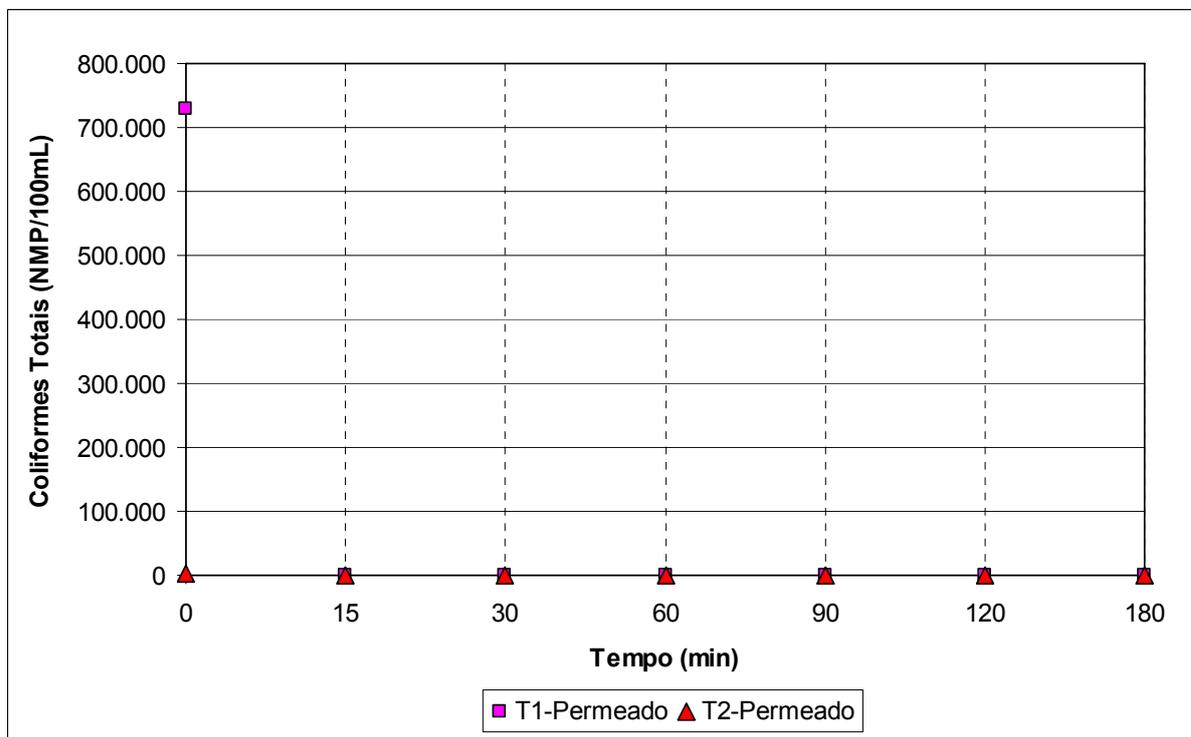
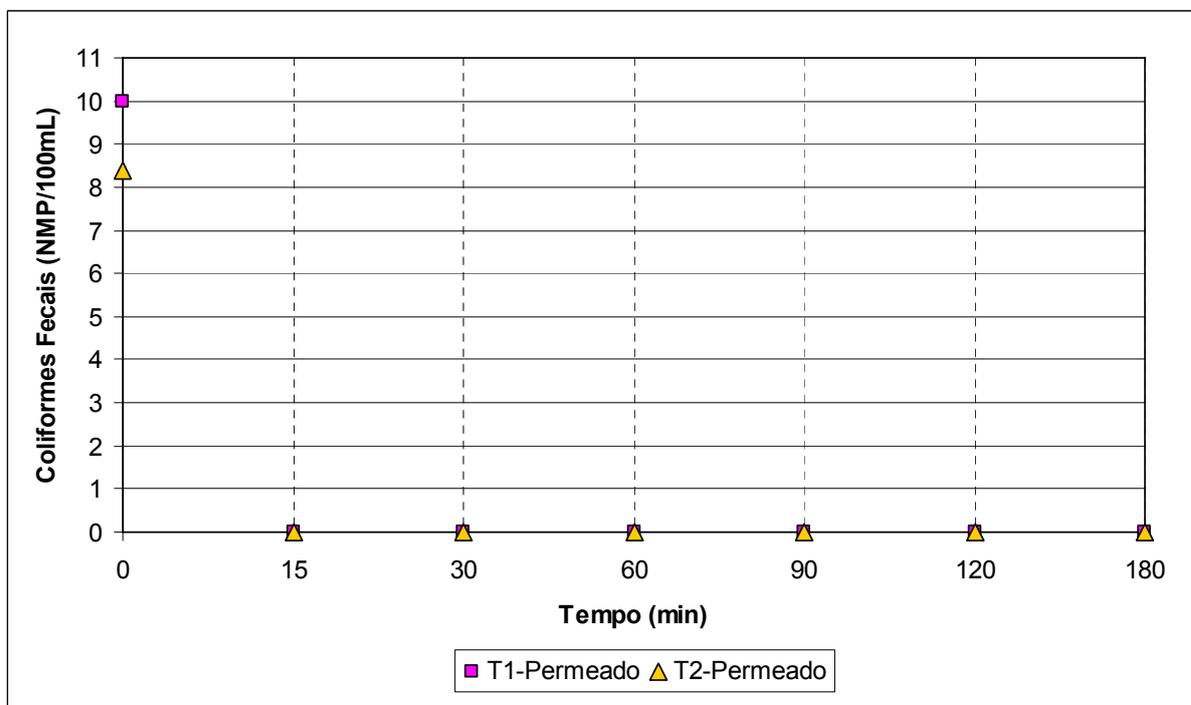


FIGURA 4.25 – VARIÇÃO DOS COLIFORMES FECAIS DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA



A remoção da DQO nas amostras do filtro do teste 01 não foram efetivas (Quadro 4.14). Houve redução apenas nos primeiros 30 minutos, voltando a se

e elevar e até a ultrapassar a concentração original após os sessenta minutos de teste. Porém no teste 02, o filtro melhorou sua performance e manteve os níveis de DQO abaixo da concentração inicial até o final do teste. Apesar da diferença de resultados entre os dois testes, deve-se registrar que foram utilizados filtros idênticos e novos em cada teste. No caso das amostras coletadas do permeado, a filtração com OR se mostrou muito eficiente. Houve remoção média de 92,9% para o teste 01 e de 98% para o teste 02, com destaque para o tempo de quinze minutos do teste 02 onde resultou em DQO de concentração zero. Para as coletas do rejeito com tempo de 180 minutos, ocorreu um esperado aumento nas concentrações de DQO. Estas tiveram um acréscimo de 26,9% e 58% nos testes 01 e 02 respectivamente.

Para o parâmetro cor, o filtro manteve características similares. No teste 01 além de não reduzir a cor aparente, a partir de noventa minutos o filtro colmatou e aumentou o parâmetro até o final do teste. No teste 02 o novo filtro conseguiu fazer boa redução de cor na primeira metade do teste, porém, ao final o parâmetro obteve o mesmo índice do efluente inicial. No caso das amostras coletadas do permeado, a filtração com OR também se mostrou muito eficiente como na remoção da DQO. Obteve remoção média da cor aparente em 98,6% para o teste 01 e 97,7% para o teste 02 (Quadro 4.14 e Figura 4.27).

No caso do CT, COT e CI, as amostras retiradas do filtro de polipropileno continuaram a manter as mesmas características dos parâmetros anteriores. Até os 120 minutos do teste 01 o COT chegou a reduzir em relação à concentração inicial, porém ao final do teste sua concentração chegou a 55,03mg/L, tornando-se maior que a inicial. O CI obteve comportamento contrário, tendo elevação no início e no decorrer do teste uma leve queda. O CT, que é composto pela soma do COT e CI, obteve maior influência dos resultados do primeiro e acabou tendo a mesma tendência ao final do teste, ou seja, elevação da concentração inicial. Para as amostras do filtro do teste 02, tanto COT, CI e CT obtiveram redução ao longo do teste. Mais uma vez, o filtro do segundo teste obteve melhor comportamento e manteve os três parâmetros abaixo de suas respectivas concentrações iniciais (Quadro 4.14). A filtração com o OR apresentou muito bons resultados quando analisadas as amostras coletadas do permeado. Para o teste 01 houve remoção média de 95,9% para o CT, de 98,4% para o COT e de 93,7% para o CI. No teste 02

a remoção média foi ainda maior, chegando a 98,1% para o CT, de 99,4% para o COT e de 96,9% para o CI. Para as coletas do rejeito com tempo de 180 minutos, o teste 01 acusou um acréscimo na concentração de 64,4% para o CT e 129,7% para o CI e uma redução de 7,2% para o COT. No teste 02 este acréscimo ocorreu nos três parâmetros, sendo de 55,9% para o CT, de 30,7% para o COT e de 77,7% para o CI. O Quadro 4.14 mostra os resultados para o DQO, Cor, CT, COT e CI após os testes com osmose reversa.

QUADRO 4.14 – VARIÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE FILTRADO TRATADO POR OSMOSE REVERSA

Tempo (min)	Parâmetros				
	DQO (mg/L)	Cor (Hazen)	CT (mg/L)	COT (mg/L)	CI (mg/L)
TESTE 01 - AMOSTRA DO FILTRO POLIPROPILENO (FP)					
0 (Tratado)	121,16	300	103,10	49,17	53,93
15	97,89	300	89,78	32,93	56,86
30	104,88	300	92,93	37,04	55,89
60	130,14	300	93,94	39,15	54,79
90	151,50	400	95,16	40,89	54,26
120	150,39	400	100,03	46,07	53,96
180	154,46	500	109,81	55,03	54,78
TESTE 01 - AMOSTRA PERMEADO OSMOSE REVERSA (FP+FCC+OR)					
0 (Tratado)	121,16	300	103,10	49,17	53,93
15	15,38	2,5	3,90	0,66	3,24
30	8,90	5,0	3,66	0,57	3,09
60	7,29	5,0	3,41	0,28	3,13
90	5,66	5,0	3,54	0,63	2,91
120	3,24	2,5	4,79	0,34	4,45
180	10,52	5,0	5,79	2,27	3,52
TESTE 01 - AMOSTRA REJEITO OSMOSE REVERSA (FP+FCC+OR)					
180	153,04	N.A.	169,50	45,64	123,90
TESTE 02 - AMOSTRA DO FILTRO POLIPROPILENO (FP)					
0 (Tratado)	140,20	300	106,61	49,51	57,10
15	71,13	60	70,25	19,10	51,15
30	63,00	80	72,00	20,64	51,36
60	79,26	150	75,05	23,61	51,44
90	94,46	200	76,15	25,93	50,21
120	73,16	200	81,26	31,32	49,94
180	107,71	300	90,99	39,03	51,95
TESTE 02 - AMOSTRA PERMEADO OSMOSE REVERSA (FP+OR)					
0 (Tratado)	140,20	300	106,61	49,51	57,10
15	0,00	5	1,78	0,12	1,66
30	1,63	5	1,81	0,10	1,71
60	0,81	5	2,03	0,15	1,88
90	3,25	5	1,97	0,13	1,84
120	4,06	10	2,79	0,09	2,70
180	7,31	10	3,79	1,54	2,25
TESTE 02 - AMOSTRA REJEITO OSMOSE REVERSA (FP+OR)					
180	221,53	N.A.	166,20	64,71	101,50

N.A.: Não avaliado.

As Figuras 4.26 e 4.27 mostram a variação da DQO e cor para as amostras do filtro e do permeado durante os testes com osmose reversa.

FIGURA 4.26 – VARIAÇÃO DA DQO DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA

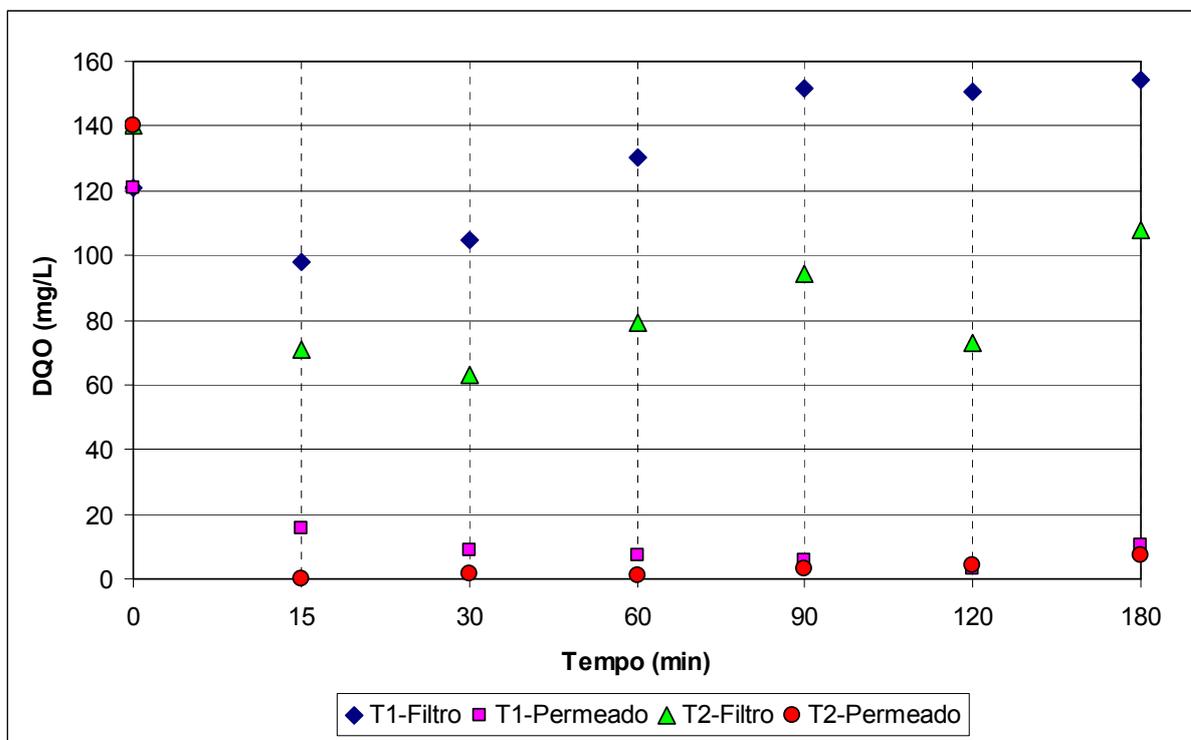
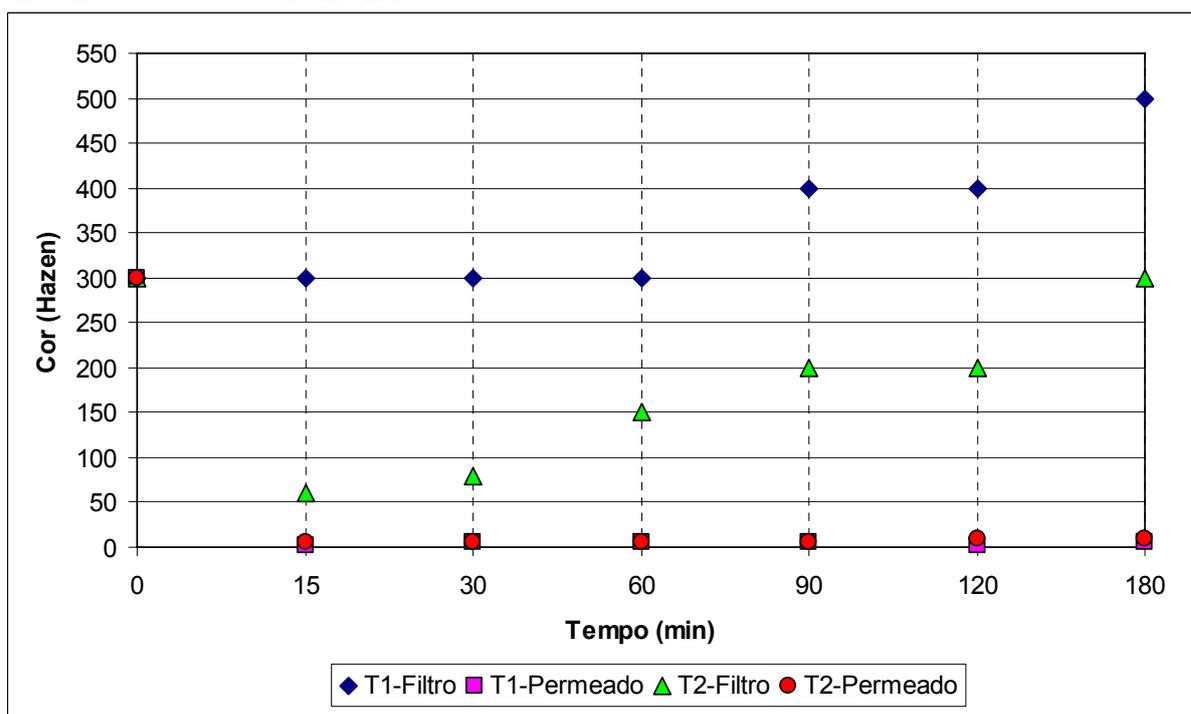


FIGURA 4.27 – VARIAÇÃO DA COR DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA



As Figuras 4.28 e 4.29 mostram a variação do CT e COT respectivamente para as amostras do filtro e do permeado durante os testes com osmose reversa.

FIGURA 4.28 – VARIÇÃO DO CARBONO TOTAL DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA

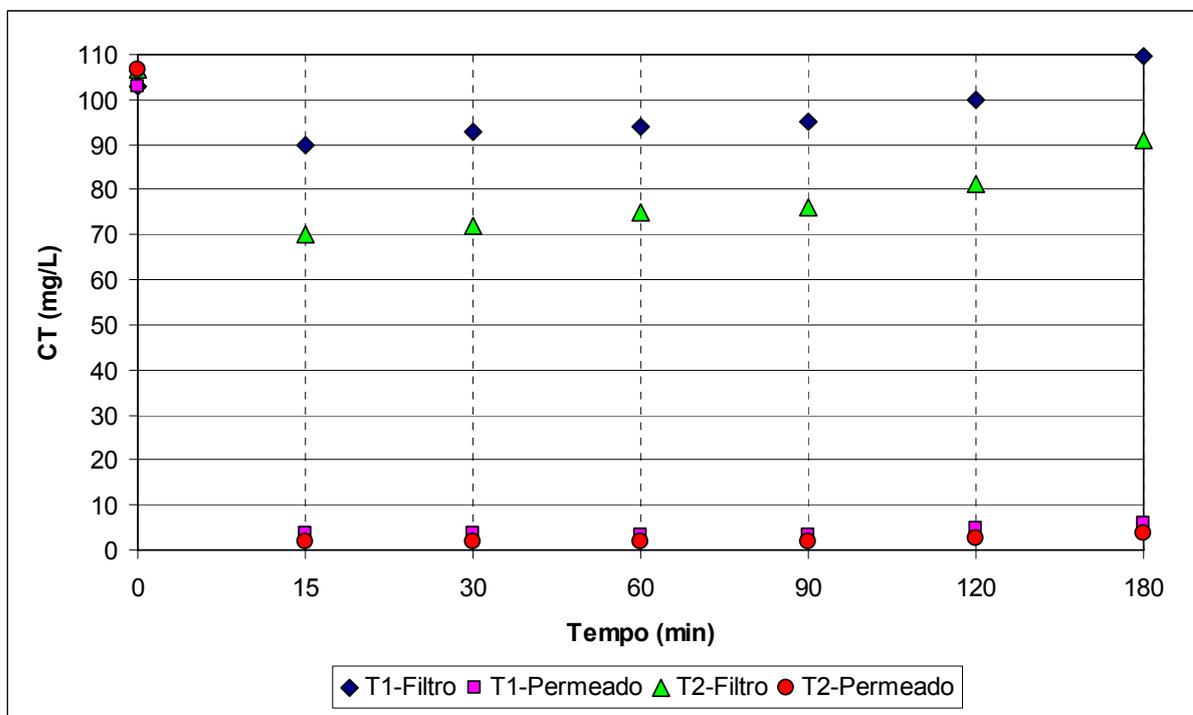
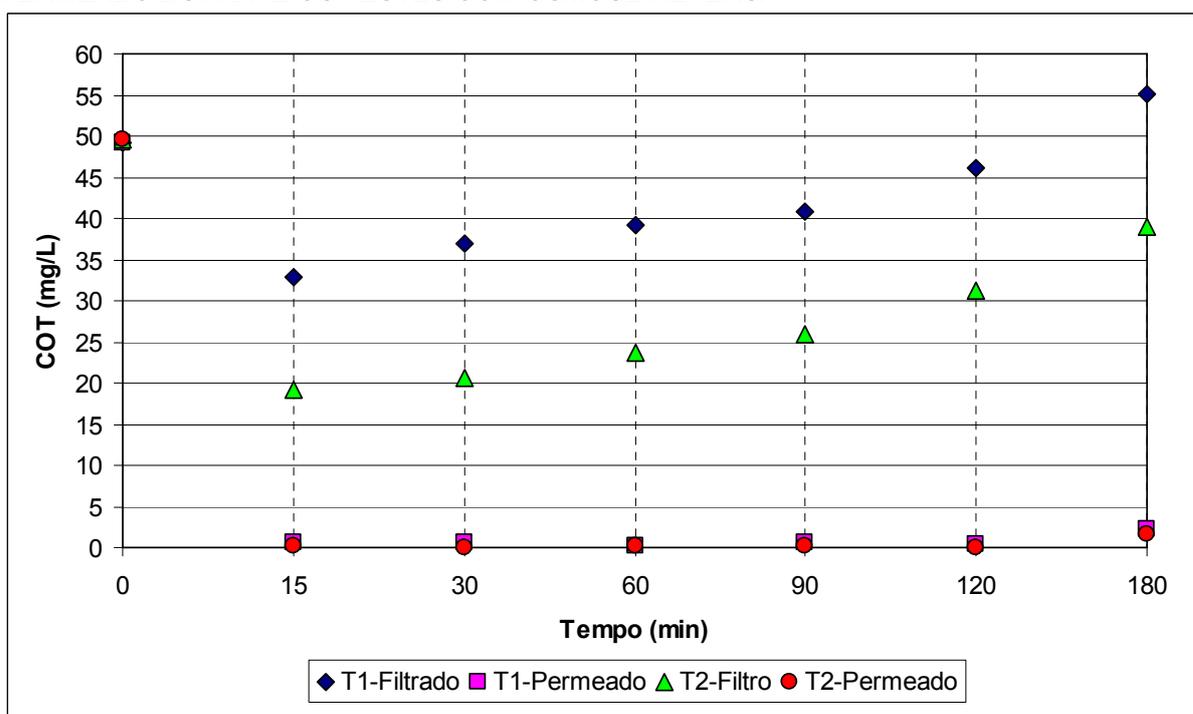
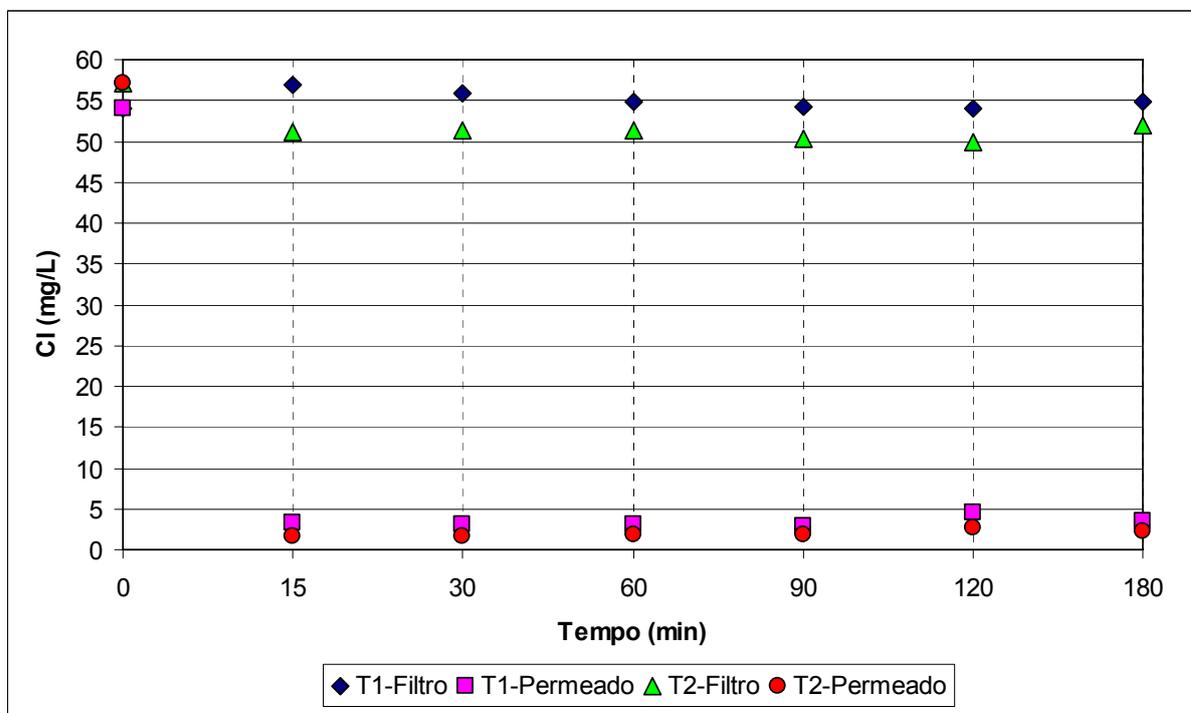


FIGURA 4.29 – VARIÇÃO DO CARBONO ORGÂNICO TOTAL DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA



A Figura 4.30 mostra a variação do CI para as amostras do filtro e do permeado durante os testes com osmose reversa.

FIGURA 4.30 – VARIÇÃO DO CARBONO INORGÂNICO DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA



O Quadro 4.15 apresenta os resultados para a turbidez, ST, SST e SDT obtidos durante os dois testes com osmose reversa. A turbidez, nas amostras do filtro, reduziram em média 41,9% no teste 01 e 71,6% no teste 02. No entanto, notou-se uma tendência de crescimento do parâmetro com o passar do tempo, para os dois testes, como pode ser observado na Figura 4.31. Quando analisadas as amostras do permeado, a turbidez se manteve a níveis mínimos e constantes para todos os tempos, à exceção da última coleta com 180 minutos que apresentou sinais de elevação. Nesta situação, as amostras tiveram a turbidez reduzida em média 97,8% no teste 01 e 96,1% no teste 02. Para as coletas do rejeito com tempo de 180 minutos as amostras apresentaram características diferentes. No teste 01 houve redução do parâmetro em 50,2% e, curiosamente no teste 02 um aumento de 47,7%.

Para os ST, SST e SDT, o filtro de polipropileno não apresentou desempenho satisfatório. No teste 01 o SDT sofreu aumento da concentração nos primeiros 30 minutos de teste e ao final ficou acabou tendo uma redução. O SST, como era de

esperar, acabou reduzindo durante o teste e manteve-se com uma remoção média de 50%. O ST, influenciado pelo resultado do SDT também teve sua concentração reduzida na segunda metade do teste. Esta redução de concentração no SDT pode ter ocorrido devido à colmatação do filtro, bloqueando assim maior quantidade de sólidos dissolvidos ao final do teste. No teste 02 as amostras coletadas forneceram resultado opostos para o SDT. Neste caso a concentração se elevou com decorrer do teste. O SST, mantendo a tendência do teste anterior, teve redução de seu valor em 52%, Porém, com o tempo de 180 minutos, o parâmetro atingiu o mesmo valor da concentração inicial. O ST, mais uma vez influenciado pelo resultado do SDT, teve sua concentração aumentada ao longo do teste (Figura 4.32). No caso das amostras coletadas após filtração com o OR (permeado), estas apresentaram novamente resultados muito bons. Para o teste 01 houve eficiência média de remoção de 94,4% para o ST, de 100% para o SST e de 94,1% para o SDT. No teste 02 a eficiência média foi ainda maior, chegando a 97,6% para o ST, de 100% para o SST e de 97,5% para o SDT. Para as amostras do rejeito com tempo de 180 minutos, pôde-se perceber com clareza as conseqüências da barreira física da membrana aos SDT e aos ST. No teste 01 houve uma concentração dos SDT no rejeito e sua na concentração aumentou em 122,5%. Os SST obtiveram uma leve remoção de 23,8% e os ST, influenciados quase que na sua totalidade pelos valores do SDT, aumentaram em 115,3%. No teste 02 a tendência de concentração dos SDT no rejeito se manteve e sua na concentração aumentou em 129,8%. Os SST neste teste aumentaram em 170,4% e os ST aumentaram em 130,5%. Estes resultados demonstram a eficiência de filtração do sistema de osmose reversa.

QUADRO 4.15 – VARIÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE FILTRADO TRATADO POR OSMOSE REVERSA

Tempo (min)	Parâmetros			
	Turbidez (NTU)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)
TESTE 01 - AMOSTRA DO FILTRO POLIPROPILENO (FP)				
0 (Tratado)	12,84	1.810	88	1.722
15	6,46	1.837	33	1.804
30	6,65	1.836	34	1.802
60	7,36	1.690	52	1.638
90	8,06	1.605	41	1.564
120	7,80	1.676	61	1.615
180	8,40	1.697	40	1.657
TESTE 01 - AMOSTRA PERMEADO OSMOSE REVERSA (FP+FCC+OR)				
0 (Tratado)	12,84	1.810	88	1.722
15	0,13	135	0	135
30	0,15	82	0	82
60	0,10	91	0	91
90	0,16	100	0	100
120	0,10	91	0	91
180	1,04	112	0	112
TESTE 01 - AMOSTRA REJEITO OSMOSE REVERSA (FP+FCC+OR)				
180	6,39	3.898	67	3.831
TESTE 02 - AMOSTRA DO FILTRO POLIPROPILENO (FP+OR)				
0 (Tratado)	9,12	1.552	27	1.525
15	1,65	1.583	11	1.572
30	1,79	1.600	9	1.591
60	2,61	1.653	5	1.648
90	2,89	1.660	10	1.650
120	3,57	1.652	16	1.636
180	5,65	1.678	27	1.651
TESTE 02 - AMOSTRA PERMEADO OSMOSE REVERSA (FP)				
0 (Tratado)	9,12	1.552	27	1.525
15	0,15	62	0	62
30	0,16	35	0	35
60	0,18	36	0	36
90	0,19	13	0	13
120	0,44	59	0	59
180	1,33	58	0	58
TESTE 02 - AMOSTRA REJEITO OSMOSE REVERSA (FP+OR)				
180	13,47	3.578	73	3.505

As Figuras 4.31 e 4.32 mostram a variação da turbidez e dos sólidos totais para as amostras do filtro e do permeado durante os testes com osmose reversa.

FIGURA 4.31 – VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA

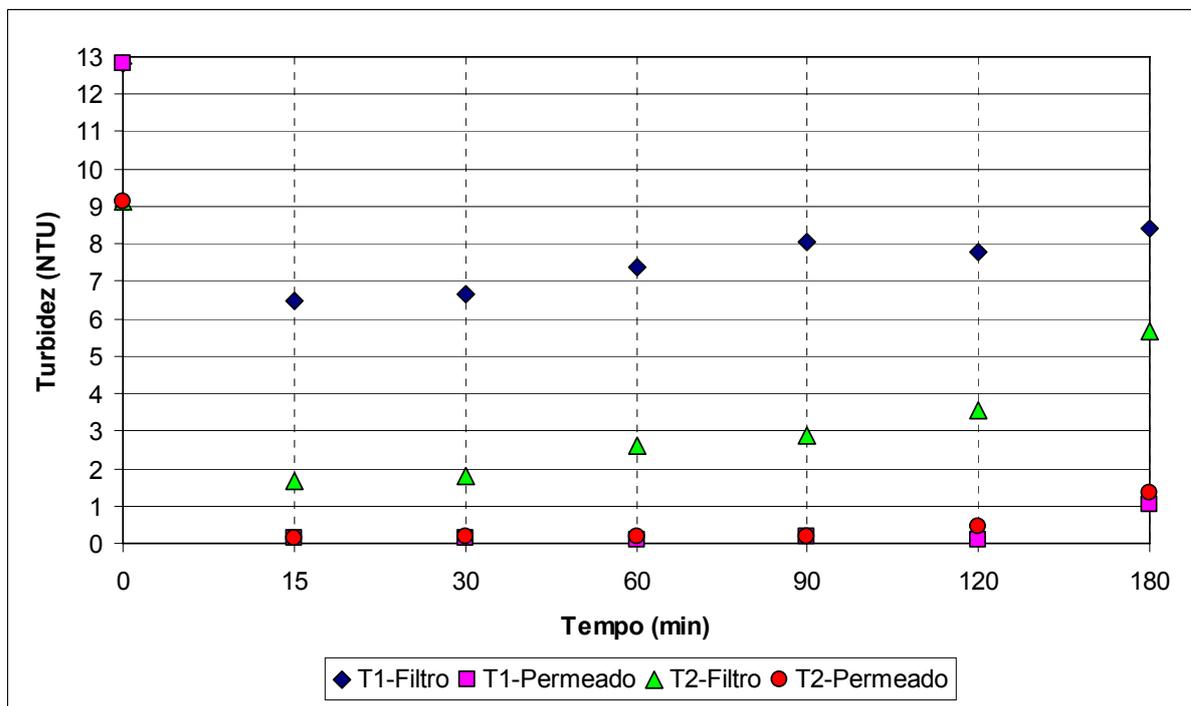
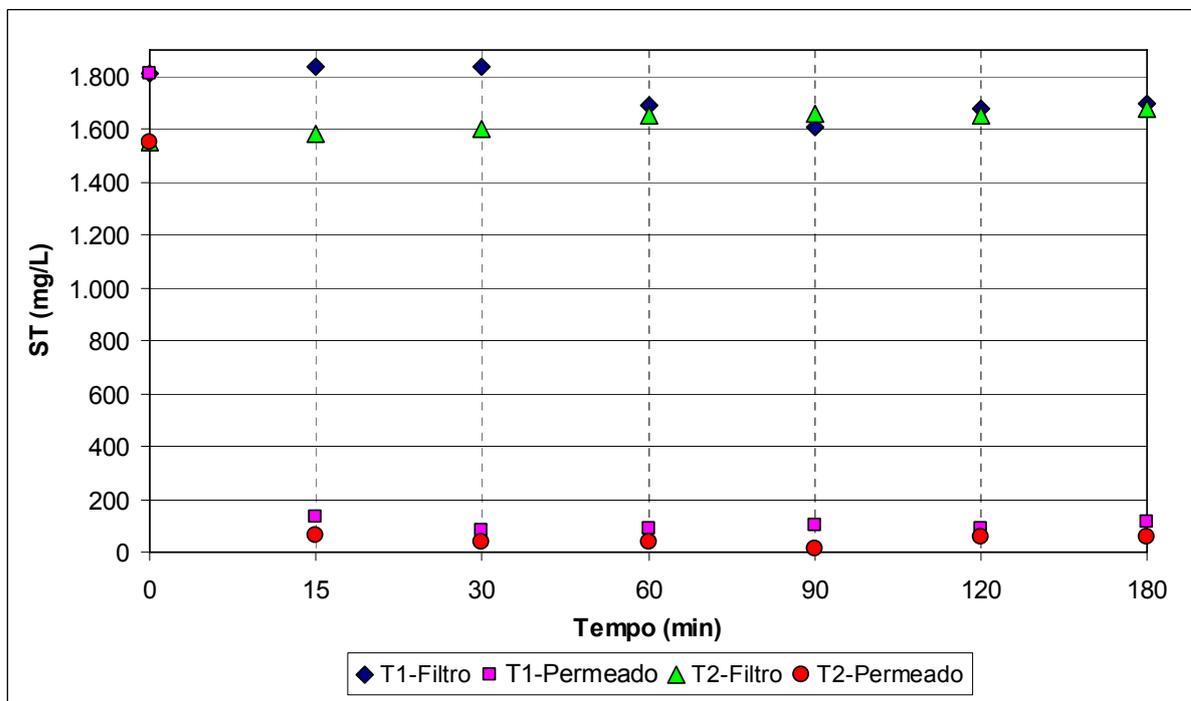


FIGURA 4.32 – VARIAÇÃO DOS SÓLIDOS TOTAIS DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA



As Figuras 4.33 e 4.34 mostram a variação dos SST e SDT para as amostras do filtro e do permeado durante os testes com osmose reversa.

FIGURA 4.33 – VARIAÇÃO DOS SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA

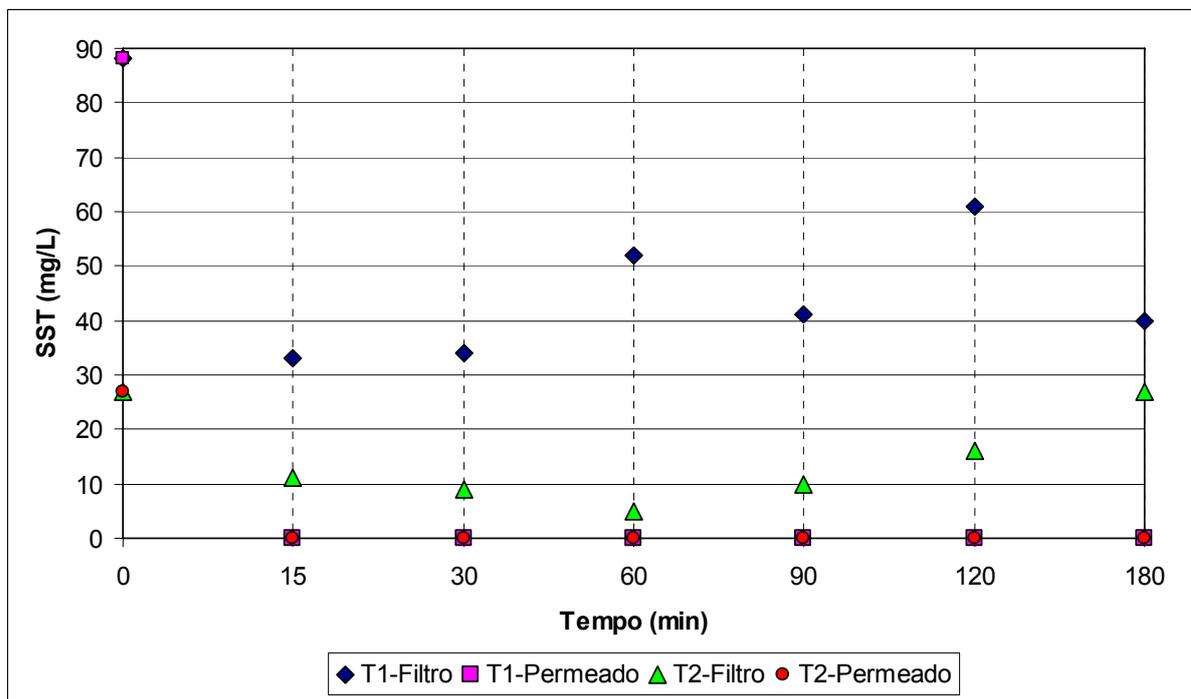
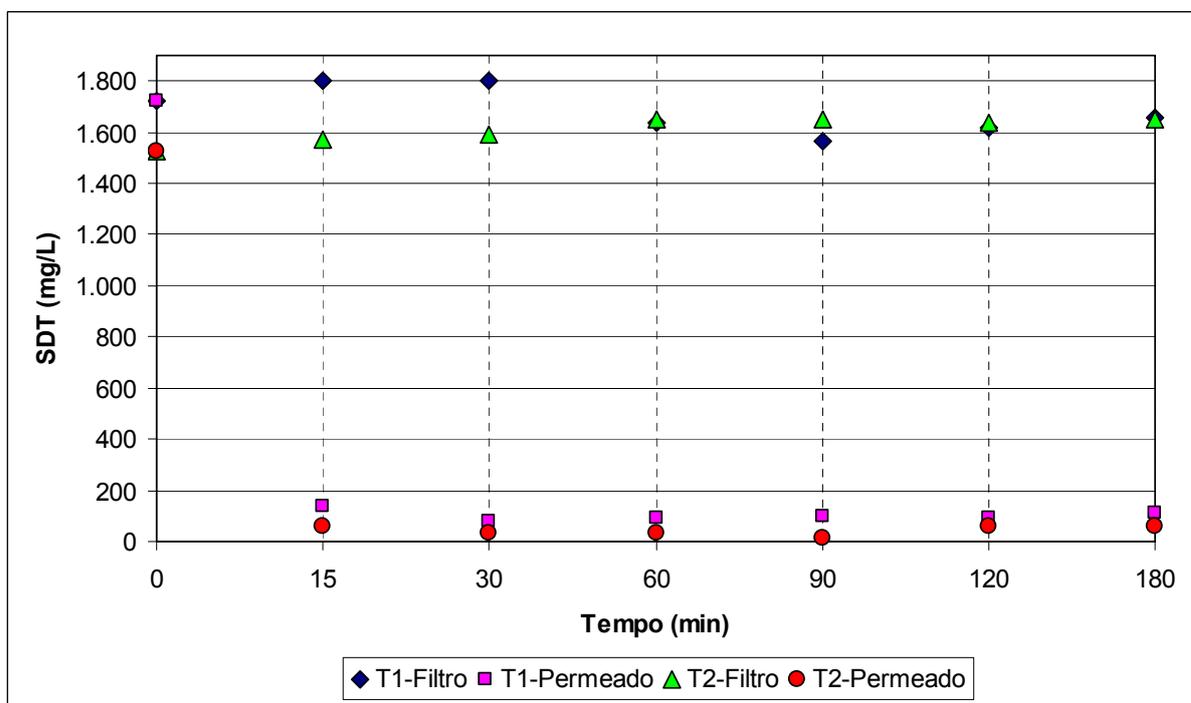


FIGURA 4.34 – VARIAÇÃO DOS SÓLIDOS DISSOLVIDOS TOTAIS DO EFLUENTE FILTRADO E DO PERMEADO DURANTE OS TESTES COM OSMOSE REVERSA



O Quadro 4.16 apresenta os resultados obtidos para a vazão durante os testes contínuos com o sistema de osmose reversa. Nota-se que ao longo do teste a vazão foi sofrendo redução, sendo mais drástica nos primeiros quinze minutos de

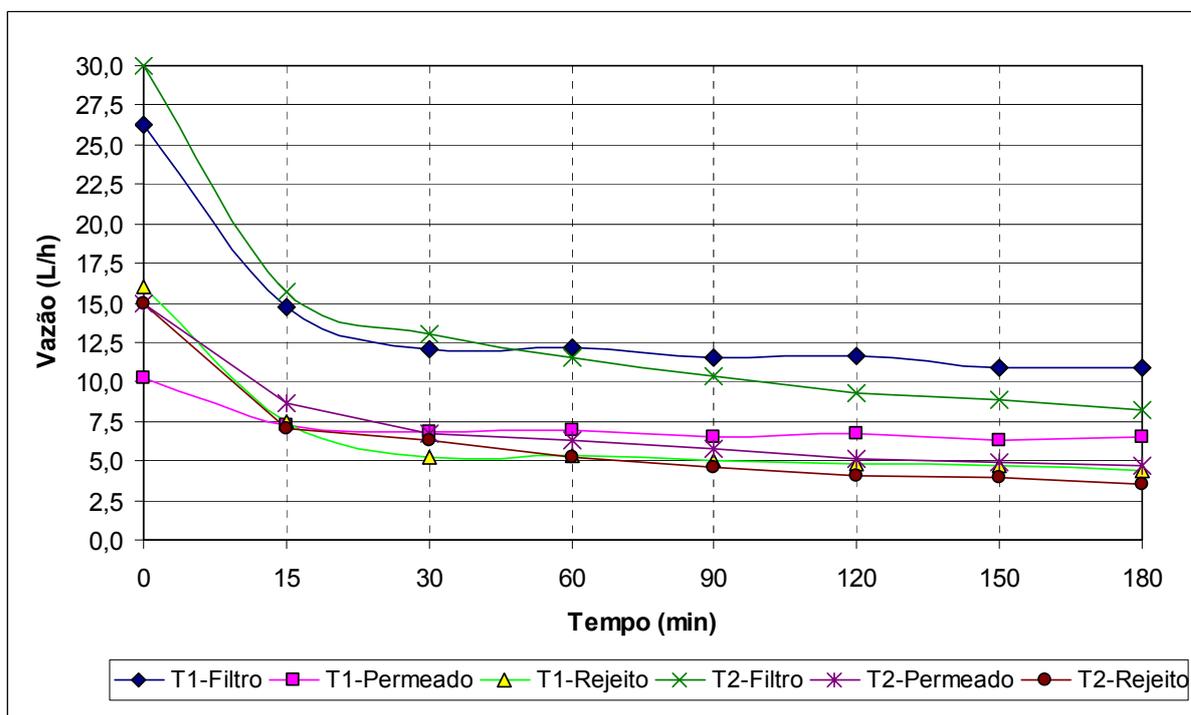
teste. Este é um comportamento típico de processos com membrana e a vazão é controlada por dois fenômenos: a polarização de constituintes e *fouling* na membrana (MADAENI, 2003). Após os primeiros trinta minutos de teste, pode-se notar que a redução na vazão começa a ficar menor e ao final do teste 01 aparenta ter tendência de estabilização, fato que não ocorre de maneira tão expressiva no teste 02. A característica do teste 02 de possuir uma vazão inicial maior que a do teste 01 e finalizar o ensaio com uma vazão menor e ainda em declínio, indicam que o filtro cartucho de carvão ativado, retirado neste teste, possa ter tido papel importante. A retirada deste filtro pode ter reduzido a perda de carga no sistema e proporcionado uma vazão inicial maior no teste 02. Também, é possível que este elemento tenha filtrado alguns constituintes do efluente no teste 01 que, quando da sua retirada no teste 02, acabou provocando um entupimento maior na membrana e prejudicando a vazão com o passar do tempo.

QUADRO 4.16 – VARIAÇÃO DA VAZÃO NOS TESTES REALIZADOS COM MEMBRANAS DE OSMOSE REVERSA

TEMPO (min)	TESTE 01			TESTE 02		
	Vazão Filtro (Total) (L/h)	Vazão do Permeado (L/h)	Vazão do Rejeito (L/h)	Vazão Filtro (Total) (L/h)	Vazão do Permeado (L/h)	Vazão do Rejeito (L/h)
0	26,28	10,28	16,00	30,00	15,00	15,00
15	14,68	7,22	7,46	15,67	8,64	7,03
30	12,03	6,83	5,20	13,00	6,71	6,29
60	12,20	6,90	5,30	11,53	6,26	5,27
90	11,52	6,50	5,02	10,33	5,74	4,59
120	11,60	6,75	4,85	9,25	5,14	4,11
150	10,94	6,26	4,68	8,83	4,90	3,93
180	10,93	6,54	4,39	8,24	4,74	3,50

A Figura 4.35 mostra os perfis da vazão durante os dois testes com as membranas de osmose reversa. A vazão passante pelo filtro de polipropileno (vazão total do sistema) foi obtida pela soma da vazão do permeado e do rejeito.

FIGURA 4.35 – PERFIS DE VAZÃO TOTAL, DO PERMEADO E DO REJEITO PARA OS TESTES COM AS DUAS MEMBRANAS DE OSMOSE REVERSA



4.2.5. Coagulação–Floculação

O Quadro 4.17 apresenta o resumo dos testes para determinação do pH, tempo de sedimentação e concentração ótimos dos coagulantes utilizados na pesquisa. Esta etapa antecedeu aos ensaios para escolha da melhor concentração dos auxiliares de coagulação. Os dados completos desta etapa podem ser visualizados no Anexo A através dos Quadros A.1 e A.2.

QUADRO 4.17 – RESULTADOS OBTIDOS DURANTE A DETERMINAÇÃO DO PH, DO TEMPO DE SEDIMENTAÇÃO E DA CONCENTRAÇÃO ÓTIMOS DOS COAGULANTES

Testes	Coagulante	pH ótimo	Tempo ótimo de Sedimentação (min)	Concentração ótima de coagulante (ppm)
Teste 01	PE 019	9,0	15	160
Teste 02	Al ₂ (SO ₄) ₃ P.A.	6,0	15	90
Teste 03	Bufloc 5122	7,5	15	150

O Quadro 4.18 apresenta os resultados para a DQO, cor, turbidez, CT, COT e Cl obtidos após coagulação-floculação com os coagulantes (PE019, Al₂(SO₄)₃ P.A. e Bufloc 5122) e auxiliares de coagulação (F11 e Bufloc 565). A DQO sofreu uma redução satisfatória para os três testes, mostrando que os produtos escolhidos estavam em consonância com o objetivo do ensaio. No teste 01 houve redução de

70,3% da DQO no melhor jarro (com 1 ppm), enquanto que nos testes 02 e 03 as reduções foram de 66,3% (jarro com 1 ppm) e 78,8% (jarro com 0,5 ppm) respectivamente.

Para a cor, nos três testes a maioria dos jarros reduziu o parâmetro de 400 Hazen para 20 Hazen, tendo variações entre 10 e 30 Hazen, como pode ser visualizado na Figura 4.37. Os resultados encontrados reduziram em média 95% o parâmetro.

A redução da turbidez ocorreu de forma mais eficiente no teste 01, onde todos os jarros apresentaram turbidez menor ou igual a 0,75 NTU. O melhor jarro do teste, com 0,75 ppm de F11, apresentou redução de 95,3%. Alguns jarros dos testes 02 e 03 também apresentaram boa remoção, tendo no teste 02 a redução do melhor jarro (0,25 ppm) ficando em 92,5% e no teste 03 o jarro com 1 ppm de Bufloc 565 reduziu a turbidez em 96,4%. Observou-se uma tendência de elevação na turbidez no teste 02 e 03 para os jarros com maior concentração de floculante, principalmente no teste 03 onde o produto utilizado era uma emulsão opaca.

QUADRO 4.18 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO POR COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO

Concentração (ppm)	Parâmetros					
	DQO (mg/L)	Cor (Hazen)	Turbidez (NTU)	CT (mg/L)	COT (mg/L)	Cl (mg/L)
TESTE 01 - PE019 + F11 (Coagulante + Floculante)						
0,0ppm (Tratado)	163,29	400,00	12,49	86,60	58,46	28,14
160 + 0,10ppm	61,63	25,00	0,75	40,76	12,36	28,40
160 + 0,25ppm	61,63	20,00	0,69	41,56	13,29	28,27
160 + 0,50ppm	63,61	10,00	0,74	43,40	12,57	30,83
160 + 0,75ppm	58,46	20,00	0,59	42,32	12,67	29,65
160 + 1,00ppm	48,38	20,00	0,64	41,78	11,11	30,68
160 + 1,50ppm	60,48	10,00	0,70	39,63	11,54	28,10
TESTE 02 - SULFATO DE ALUMÍNIO PA + F11 (Coagulante + Floculante)						
0,0ppm (Tratado)	163,29	400,00	12,49	86,60	58,46	28,14
90 + 0,10 ppm	55,76	30,00	1,02	23,44	12,28	11,15
90 + 0,25 ppm	60,18	20,00	0,93	26,19	12,51	13,69
90 + 0,50 ppm	57,77	10,00	1,10	25,27	12,07	13,20
90 + 0,75 ppm	65,39	20,00	1,32	25,28	12,97	11,67
90 + 1,00 ppm	54,96	20,00	1,28	24,09	12,42	11,67
90 + 1,50 ppm	55,76	20,00	1,91	24,17	12,86	11,31
TESTE 03 - BUFLOC 5122 + BUFLOC 565 (Coagulante + Floculante)						
0,0ppm (Tratado)	163,29	400,00	12,49	86,60	58,46	28,14
150 + 0,50ppm	34,50	20,00	0,76	35,95	12,34	23,61
150 + 1,00ppm	42,52	20,00	0,45	37,44	14,30	23,14
150 + 2,00ppm	40,52	20,00	0,73	37,44	13,24	24,12
150 + 4,00ppm	46,54	10,00	1,04	37,34	12,86	24,48
150 + 6,00ppm	37,31	20,00	1,43	40,92	14,35	26,57
150+10,00ppm	49,75	20,00	2,48	40,88	15,05	25,83

No caso do CT, COT e CI, as amostras dos três testes apresentaram bons resultados em termos de remoção, especialmente o COT. Para o teste 01 no jarro com melhor desempenho (1,5 ppm) houve remoção de 54,2% para o CT e de 80,2% para o COT. O CI não foi removido para este jarro, e, na no restante dos jarros houve um aumento na concentração. No teste 02, o jarro com melhor remoção (0,10 ppm) reduziu o CT em 72,9%, o COT em 78,9% e o CI em 60,3%. Para o teste 03 manteve-se uma tendência intermediária, entre os testes anteriores. Neste caso, no jarro com melhor desempenho (0,50 ppm) houve remoção de 58,5% para o CT, de 78,9% para o COT e de 16,1% para o CI.

Pode-se perceber uma diferença na eficiência entre o teste 01 e 02, apesar do uso do mesmo auxiliar de coagulação e da mesma concentração o teste 02 obteve melhores remoções na maioria dos parâmetros analisados.

As Figuras 4.36 e 4.37 mostram a variação da DQO e da cor após os testes com os coagulantes e auxiliares de coagulação.

FIGURA 4.36 – VARIÇÃO DA DQO DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO

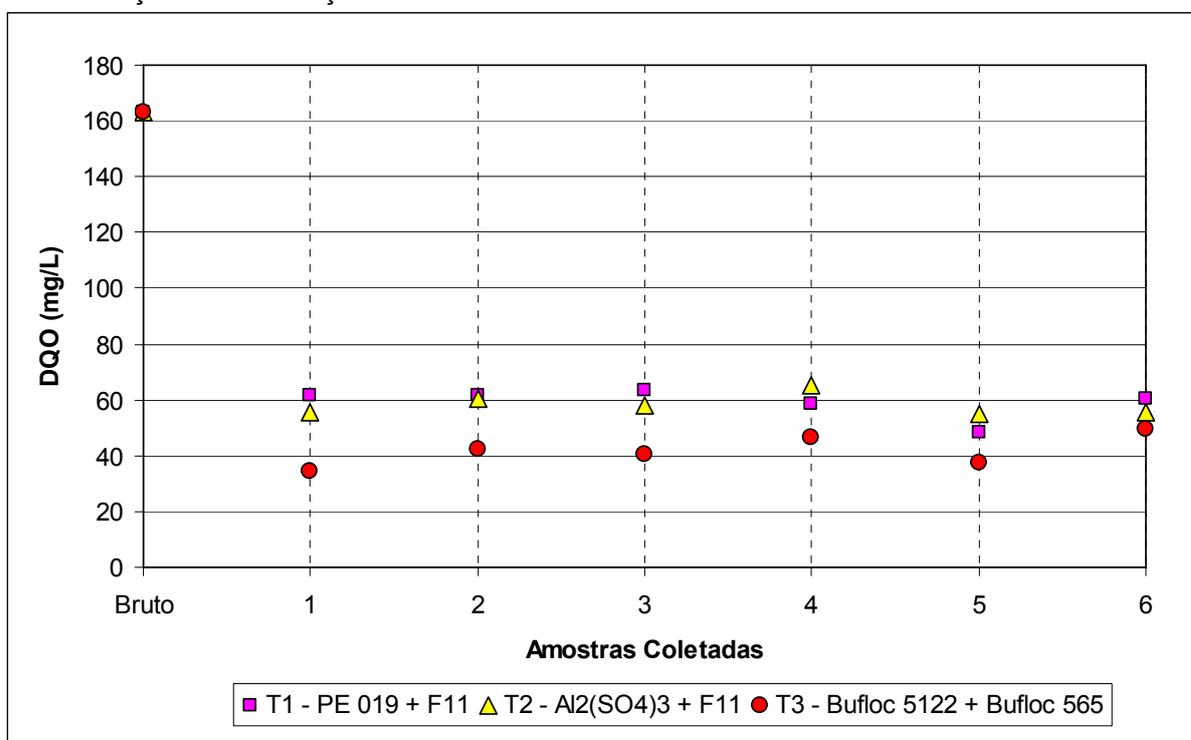
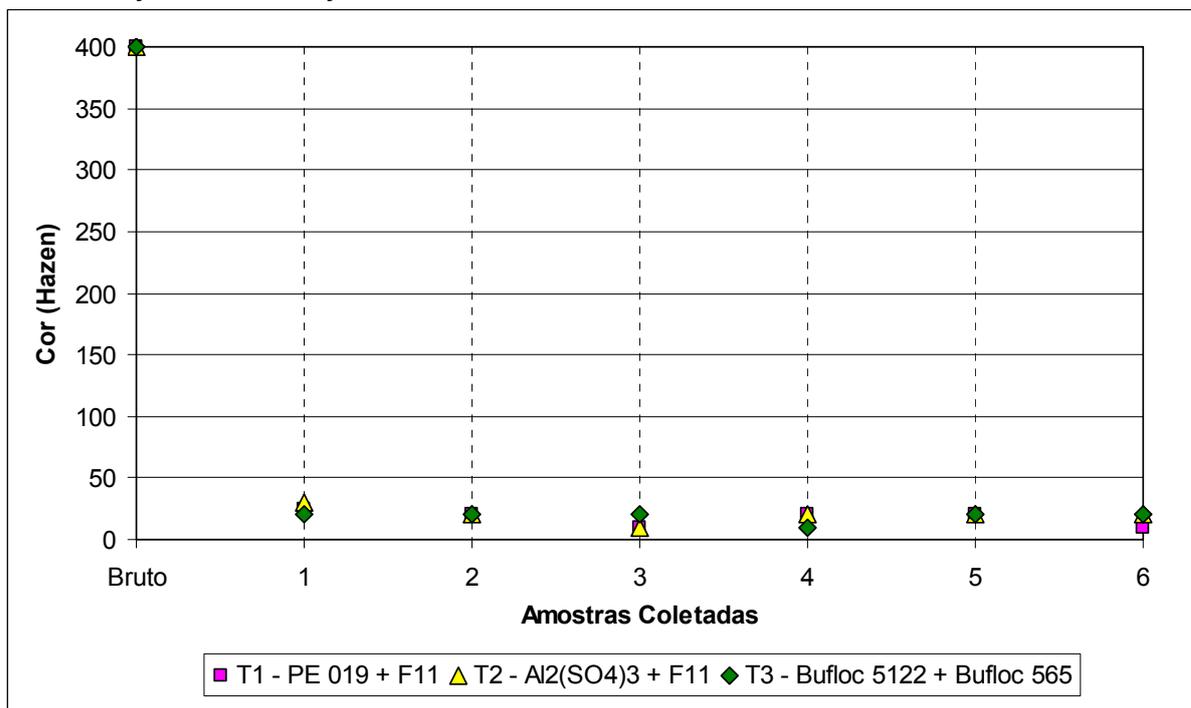


FIGURA 4.37 – VARIACÃO DA COR DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO



As Figuras 4.38 e 4.39 mostram a variação da turbidez e do CT após os testes com os coagulantes e auxiliares de coagulação.

FIGURA 4.38 – VARIACÃO DA TURBIDEZ DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO

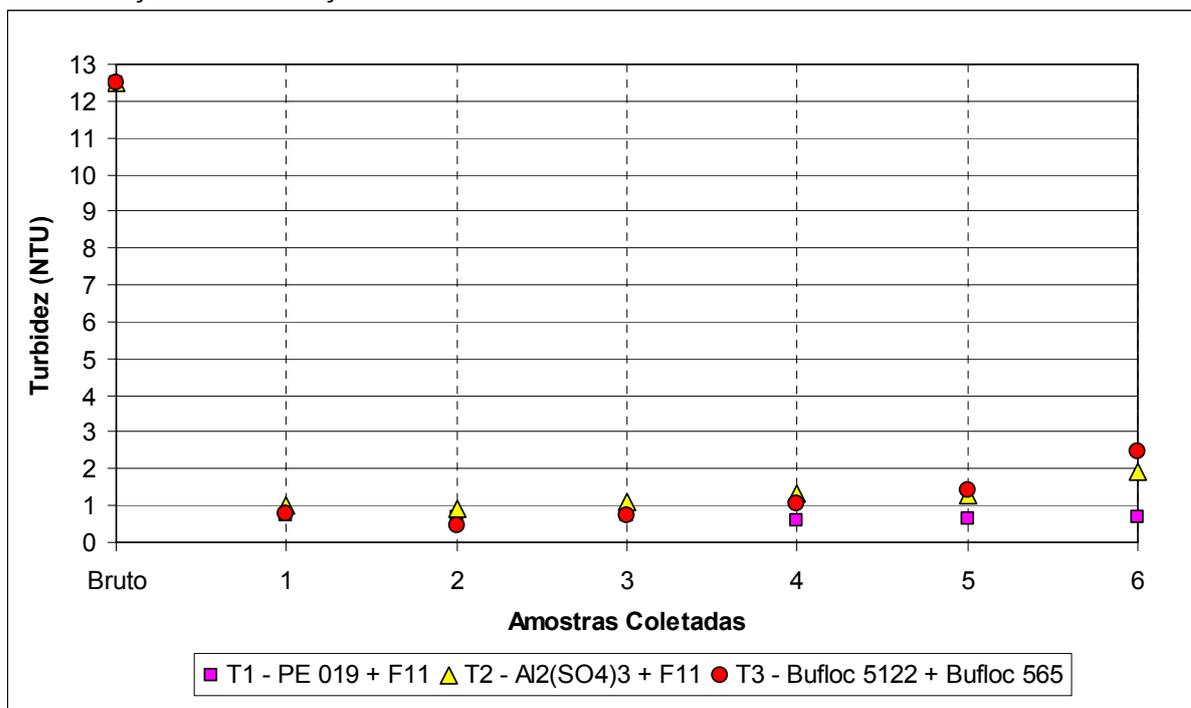
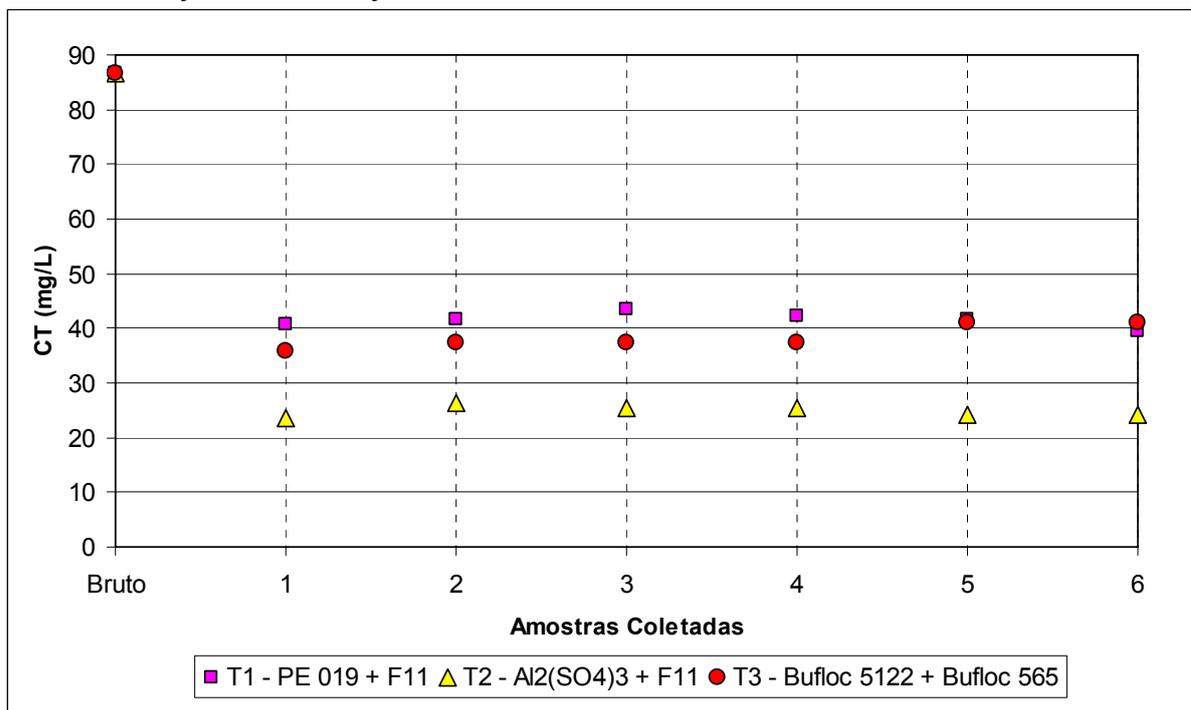


FIGURA 4.39 – VARIÇÃO DO CARBONO TOTAL DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO



As Figuras 4.40 e 4.41 mostram a variação do COT e Cl após os testes com os coagulantes e auxiliares de coagulação.

FIGURA 4.40 – VARIÇÃO DO CARBONO ORGÂNICO TOTAL DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO

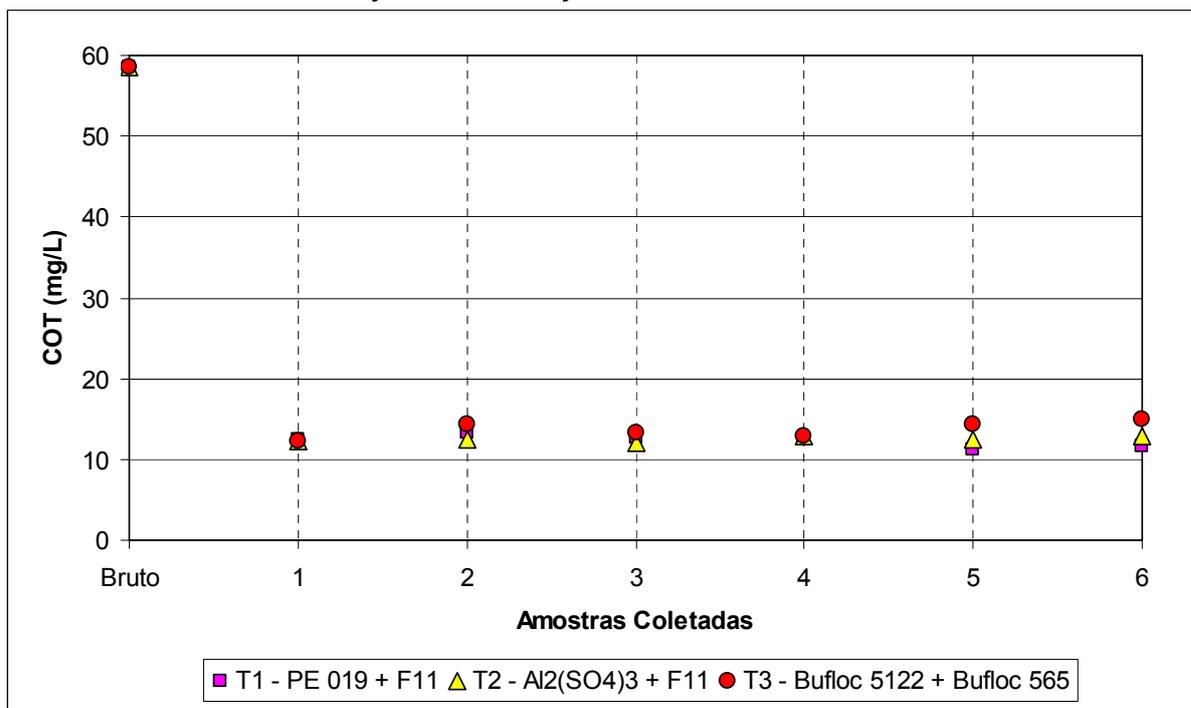
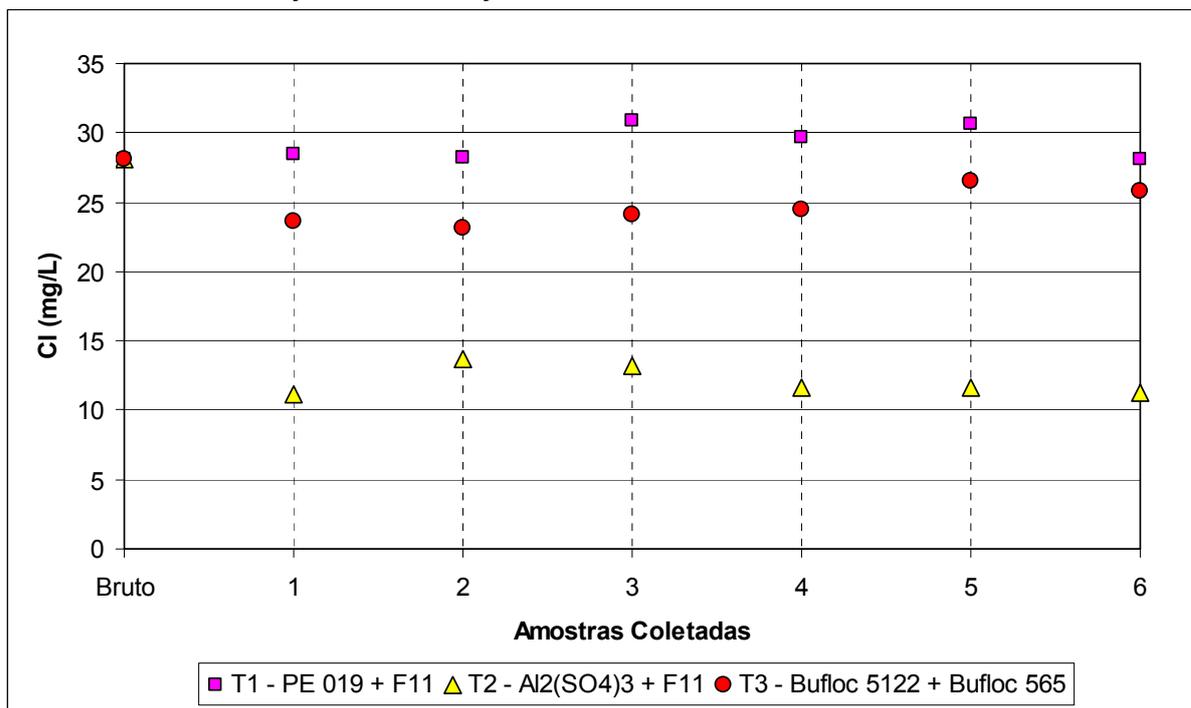


FIGURA 4.41 – VARIÇÃO DO CARBONO INORGÂNICO DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO



O Quadro 4.19 apresenta os resultados para o pH, ST, SST e SDT após aplicados os auxiliares de coagulação. Para o caso do pH, este apresentou a mesma tendência para os três testes. O efluente tratado apresentou pH inicial de 9,35 e após a floculação, todos os jarros obtiveram um pH próximo da neutralidade, variando entre 7,05 e 7,45, como pode ser visualizado na Figura 4.42. Os resultados encontrados reduziram o parâmetro entre 24,6% e 20,3%.

Para os parâmetros ST, SST e SDT, as amostras dos três testes apresentaram boas reduções apenas para os SST, tendo os SDT se elevado e trazendo consigo os ST. Para o teste 01 no jarro com melhor desempenho (1,0 ppm) houve remoção de 74,5% para o SST. Os SDT e ST apresentaram elevação em todos os jarros. No teste 02 a tendência se manteve e o jarro com melhor remoção (0,10 ppm) reduziu o SST em 85,4%. Novamente os SDT e ST apresentaram elevação com a adição dos polieletrólitos. Por fim, o teste 03 apresentou os melhores resultados para ST, SST e SDT dentre os três ensaios. Neste caso, o jarro com melhor remoção (1,0 ppm) reduziu o SST em 100%, porém não houve redução dos ST e SDT e sim um aumento destes parâmetros.

QUADRO 4.19 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE TRATADO POR COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO

Concentração (ppm)	Parâmetros				
	Temperatura durante as análises (°C)	pH	ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)
TESTE 01 - PE019 + F11 (Coagulante + Floculante)					
0,0ppm (Tratado)	22,50	9,35	1.484	55	1.429
160 + 0,10ppm	18,00	7,45	1.574	16	1.558
160 + 0,25ppm	19,00	7,40	1.683	16	1.667
160 + 0,50ppm	18,50	7,05	1.631	16	1.615
160 + 0,75ppm	18,50	7,10	1.617	16	1.601
160 + 1,00ppm	18,00	7,38	1.605	14	1.591
160 + 1,50ppm	18,50	7,33	1.485	21	1.464
TESTE 02 - SULFATO DE ALUMÍNIO PA + F11 (Coagulante + Floculante)					
0,0ppm (Tratado)	22,50	9,35	1.484	55	1.429
90 + 0,10 ppm	23,00	7,41	1.474	8	1.466
90 + 0,25 ppm	23,00	7,37	1.560	19	1.541
90 + 0,50 ppm	23,00	7,34	1.573	14	1.559
90 + 0,75 ppm	23,00	7,27	1.549	20	1.529
90 + 1,00 ppm	23,00	7,14	1.575	16	1.559
90 + 1,50 ppm	23,00	7,13	1.592	20	1.572
TESTE 03 - BUFLOC 5122 + BUFLOC 565 (Coagulante + Floculante)					
0,0ppm (Tratado)	22,50	9,35	1.484	55	1.429
150 + 0,50ppm	22,00	7,31	1.497	2	1.495
150 + 1,00ppm	22,00	7,42	1.542	0	1.542
150 + 2,00ppm	22,00	7,16	1.467	6	1.461
150 + 4,00ppm	22,00	7,18	1.473	4	1.469
150 + 6,00ppm	22,00	7,23	1.434	3	1.431
150 + 10,00ppm	22,00	7,15	1.446	2	1.444

Durante os três testes, notou-se uma tendência de elevação dos SDT e, conseqüentemente dos ST. Para o teste 01 e 03 esta elevação se mostrou maior nos jarros com baixa e média concentração de floculante, tendência esta que se reduzia para os jarros com altas concentrações (Figuras 4.43 e 4.45). No teste 02 a tendência de aumento na concentração foi maior quanto maior a concentração de floculante.

As Figuras 4.42 e 4.43 mostram a variação do pH e dos ST após os testes com os coagulantes e auxiliares de coagulação.

FIGURA 4.42 – VARIÇÃO DO PH DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO

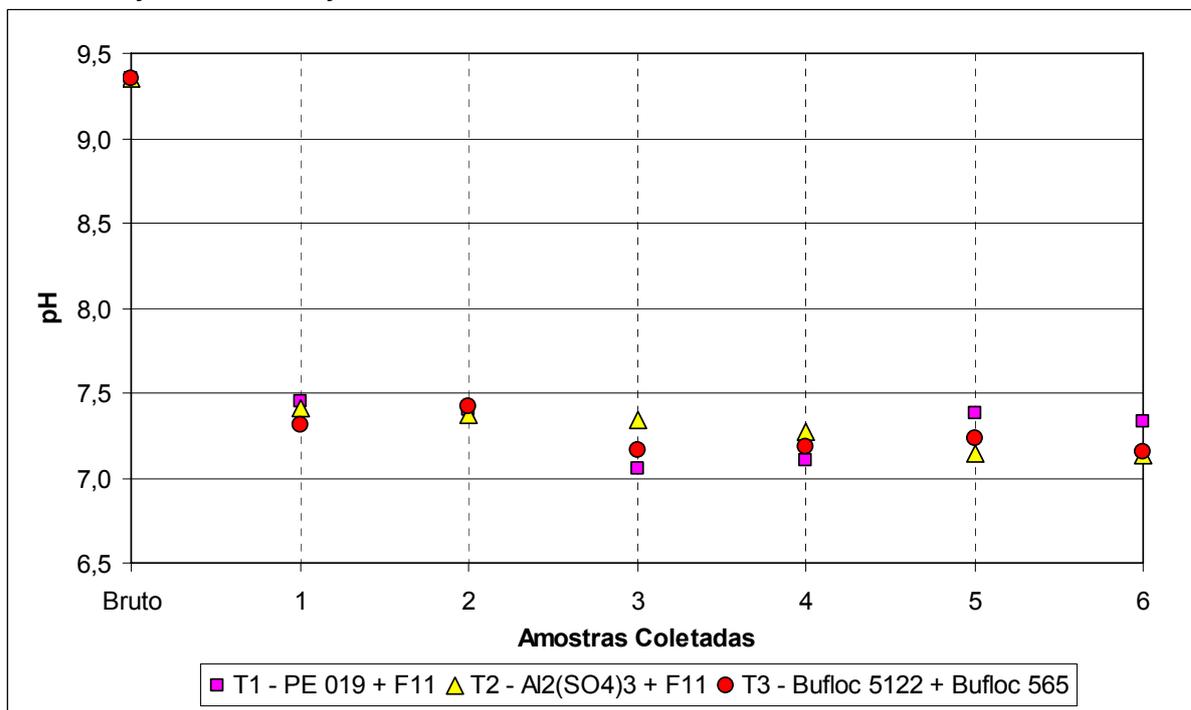
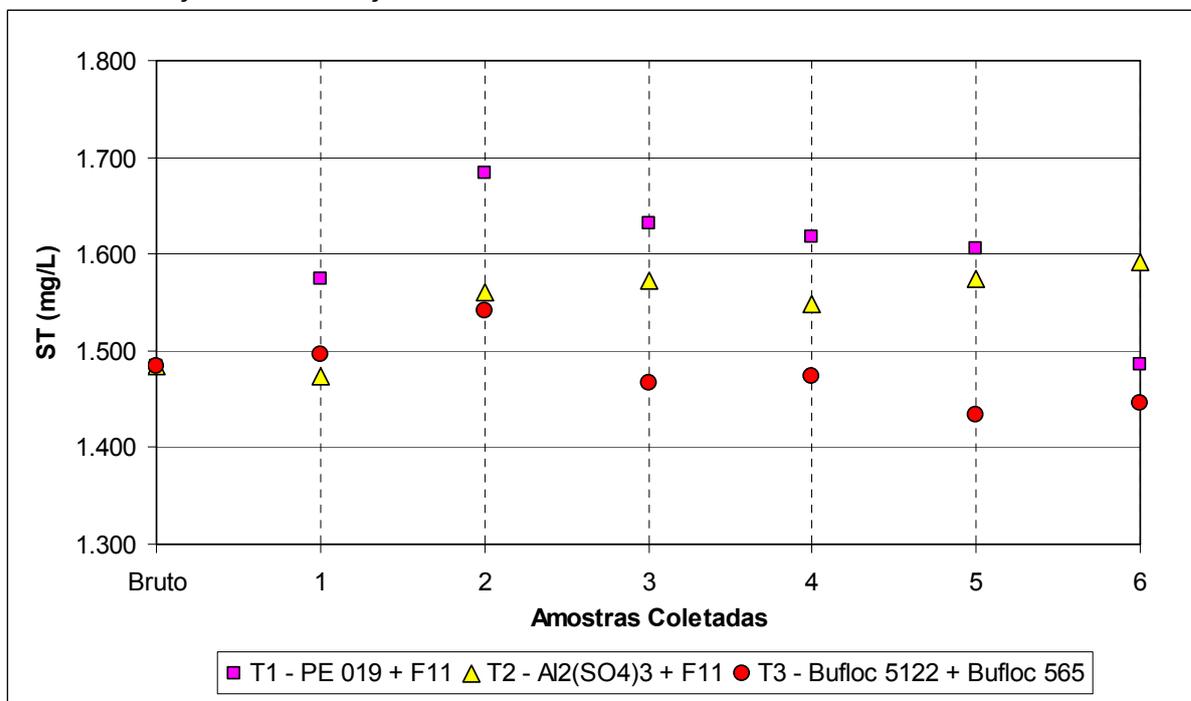


FIGURA 4.43 – VARIÇÃO DOS SÓLIDOS TOTAIS DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO



As Figuras 4.44 e 4.45 mostram a variação dos SST e SDT após os testes com os coagulantes e auxiliares de coagulação.

FIGURA 4.44 – VARIAÇÃO DOS SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO

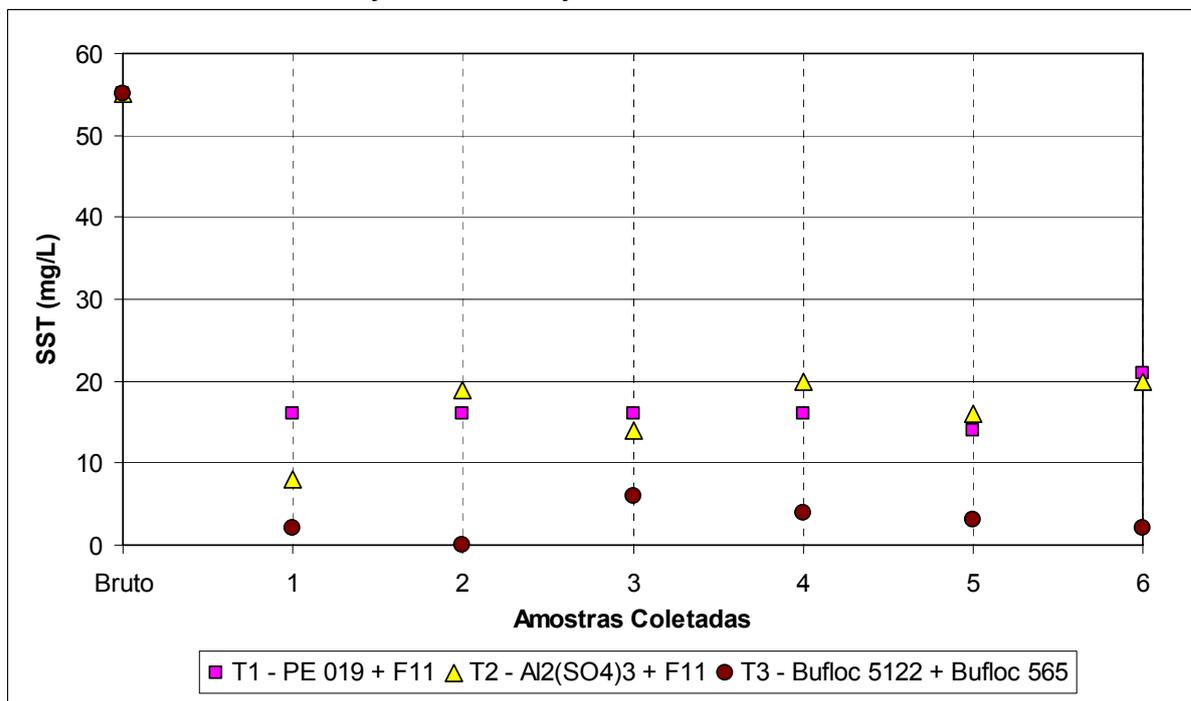
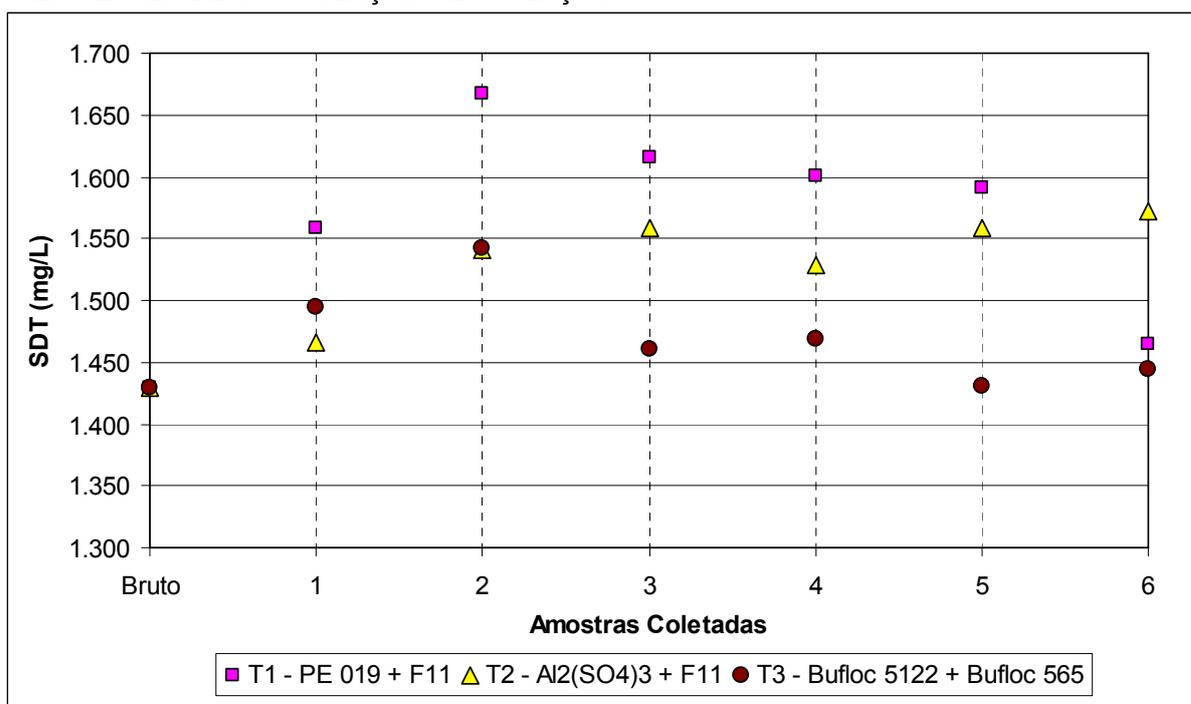


FIGURA 4.45 – VARIAÇÃO DOS SÓLIDOS DISSOLVIDOS TOTAIS DO EFLUENTE DURANTE OS TRÊS TESTES DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO



4.3. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DAS TECNOLOGIAS E DOS CRITÉRIOS DE REÚSO ADOTADOS

Analisando qualitativamente os parâmetros do efluente tratado por **carvão ativado**, estes se mostraram muito satisfatórios em comparação com os requisitos adotados no Quadro 3.2 para reúso do efluente nas quatro categorias propostas para a indústria.

No primeiro teste (Quadro 4.2), para determinação do tempo de contato com dois gramas de carvão, a partir de 5 minutos, os parâmetros DQO, a turbidez e a DBO (uma vez que a DBO é sempre menor ou igual à DQO) atenderam aos requisitos das quatro opções de reúso propostas no Quadro 3.2. O parâmetro cor que obteve resultado $\leq 2,5$ em todos os tempos, também estaria apto a ser usado nas quatro opções. Já o parâmetro pH ficou acima da faixa para todos os potenciais locais de reúso sugeridos (ver Quadros 4.20 a 4.23).

Para o segundo teste (Quadro 4.3), durante a determinação da taxa de adsorção, nos jarros contendo 0,10 gramas ou mais de carvão, a DQO, a turbidez e a DBO também atenderam aos requisitos das quatro opções de reúso. Considerando as concentrações máximas de 15 mg/L para DQO e 10mg/L para DBO permitidas para a água de alimentação do tanque de imersão da pintura cataforética, os jarros a partir de 0,30 gramas também estariam aptos a atender este uso. Porém, o pH, mais uma vez não sofreu ação do tratamento e se manteve fora da faixa de aceitação para todos os tipos de reúso proposto.

No caso do efluente oxidado por **ozônio**, observou-se que, tanto o efluente tratado (teste 01) como o filtrado (teste 02) apresentaram limitações para atender aos requisitos adotados no Quadro 3.2. Levando em consideração o tratamento com 15 minutos de tempo de contato, o efluente do teste 01 não atenderia de forma completa aos requisitos de nenhuma das quatro categorias de reúso propostas. A categoria que estaria mais próxima das características deste efluente tratado seria o reúso em torres de resfriamento, porém ainda ficam fora dos padrões a turbidez (≤ 3 NTU), os ST (≤ 530 mg/L), SST (≤ 30 mg/L) e SDT (≤ 500 mg/L).

Se for levado em consideração o efluente filtrado do teste 02, este apresentou melhores resultados, porém, ainda os parâmetros ST, SST e SDT superam os limites para reúso no processo de pintura e os ST e SDT para torres de resfriamento

(Quadros 4.20 e 4.21). No caso do pH, este ficou acima do recomendado apenas para o reúso na pintura e a turbidez superou o limite para três potenciais locais de reúso: processo de pintura, lavagem de pisos e irrigação de áreas verdes e descarga sanitária (Quadros 4.20, 4.22 e 4.23). A cor também não atendeu a nenhum potencial local de reúso que possuísse diretriz especificada.

Fazendo a avaliação do efluente oxidado por **dióxido de cloro** para reutilização, observou-se que, tanto o efluente tratado (teste 01) como o filtrado (teste 02) não estariam aptos para atender de uma só vez a todos os requisitos adotados no Quadro 3.2. Apenas os resultados para pH, coliformes totais e fecais estariam dentro da faixa de aceitação para os quatro locais de reúso proposto. A concentração de DBO estaria de acordo para reúso nas torres de resfriamento e processo de pintura (Quadros 4.20 e 4.21). Os SST estariam de acordo para reúso apenas nas torres de resfriamento (Quadro 4.21). Já os demais parâmetros analisados ou não atenderam ou não possuíam requisitos para reúso.

Deve-se lembrar que a remessa de efluente utilizada para os testes de oxidação com ClO_2 apresentou a segunda maior concentração de DQO, e as maiores de CT e Cl para o efluente tratado apresentados no Quadro 3.3 e, portanto, estes parâmetros ficaram acima da média das coletas apresentadas no Quadro 4.1. Porém, a capacidade de remoção apresentada pelo ClO_2 para estes e outros parâmetros indica que, mesmo com a concentração um pouco abaixo ou na mesma faixa das demais remessas o tratamento provavelmente não teria capacidade de reduzi-los aos níveis de reúso propostos.

Analisando o efluente filtrado por **osmose reversa** à luz da reutilização, observou-se que, tanto o permeado do teste 01 como do teste 02 apresentaram muito bons resultados em comparação aos requisitos adotados no Quadro 3.2. Os parâmetros, pH, turbidez, cor, DQO, DBO, ST, SST, SDT, coliformes totais e coliformes fecais tanto do teste 01 como do teste 02, atenderam plenamente as quatro categorias propostas para reúso (Quadros 4.20 a 4.23). Pode-se afirmar ainda, que as concentrações de DQO e DBO destes efluentes filtrados estão abaixo do limite de 15 mg/L para DQO e 10mg/L para DBO e estariam aptos a serem usados diretamente como água de alimentação para o tanque de imersão da pintura cataforética. No caso dos valores da condutividade, a média de 72,80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para o

teste 01 e de 52,72 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para o teste 02, estariam adequadas para o reúso em torres de resfriamento e para as demais finalidades propostas, uma vez que não há diretrizes especificadas para os outros locais de reúso.

No caso do tratamento por **coagulação-floculação**, a análise dos resultados mostrou que o teste 03 apresentou o melhor desempenho médio na redução dos constituintes dentre os três testes realizados. Levando em consideração a maior redução na DQO como parâmetro de referência, neste teste o jarro com 150 ppm de Bufloc 5122 e 0,5 ppm de Bufloc 565 obteve a redução mais significativa. Com isso, optou-se fazer a análise de reúso para este jarro.

Comparando os resultados encontrados neste teste com os apresentados no Quadro 3.2 observou-se que a DQO, DBO e cor atenderam as diretrizes para reúso em torres de resfriamento e processo de pintura (Quadros 4.20 e 4.21). O pH, turbidez e os SST obtiveram resultados ainda melhores e estariam aptos a atender as quatro categorias propostas para reúso (Quadros 4.20 a 4.23). No entanto, os SDT estariam acima do permitido para todas as categorias de reúso propostas. Como consequência deste parâmetro, os ST, que possui os SDT em sua composição, estaria fora dos padrões pelo mesmo motivo. Os valores para coliformes totais e fecais não puderam ser comparados devido estes não terem sido analisados para esta tecnologia, uma vez que a coagulação-floculação não é efetiva na remoção destes parâmetros.

Deve-se alertar que, se levados em consideração todos os parâmetros conjuntamente, e não de forma isolada, o efluente tratado por coagulação-floculação não estaria apto a ser usado em nenhum dos quatro locais propostos para reúso devido ao excesso de SDT. Entretanto, todas as demais tecnologias propostas seriam beneficiadas pelo uso da coagulação/floculação como pré-tratamento, já que esta baixou sensivelmente a DQO, cor, COT, SST e turbidez. Para viabilizar o reúso desta tecnologia, poderia, ainda, ser recomendada uma revisão para o critério do SDT permitindo assim o uso deste efluente tratado por coagulação/floculação.

A comparação completa da eficiência de remoção das tecnologias em relação aos critérios adotados para os quatro potenciais locais de reúso pode ser observada nos Quadros 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23.

QUADRO 4.20 – COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO AVANÇADO EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO DE REÚSO PARA ÁGUA DE PROCESSO

Tecnologia	Resultado do tratamento	Parâmetros e seus requisitos para reúso													
		DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Cor (Hazen)	CT (mg/L)	COT (mg/L)	CI (mg/L)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	Turbidez (NTU)	pH	CT _M (NMP/100ml)	CF (NMP/100ml)	Condutividade (µ.S/cm)
		≤ 30	≤ 50	≤ 20	SE	SE	SE	≤ 1005	≤ 5	≤ 1000	≤ 2	6 - 8	≤ 2,2	Ausente	SE
Carvão Ativado ⁽¹⁾	Remoção		4,78	< 2,5	9,38	2,51	6,87				0,71	9,43	< 1	< 1	
	Eficiência		96,2%	99,4%	72,5%	91,3%	⁽⁶⁾				90,4%	⁽⁶⁾	0,0%	0,0%	
Ozônio ⁽²⁾	Remoção		46	26	56,34	16,88	39,46	1392	7	1385	2,29	8,23	< 1	< 1	
	Eficiência		24,1%	74,5%	6,0%	17,0%	0,3%	⁽⁶⁾	46,0%	⁽⁶⁾	45,6%	5,5%	100,0%	100,0%	
Dióxido de Cloro ⁽³⁾	Remoção	12,22	124,37	40	116	44,34	71,63	1.675	25	1.650	5,76	7,61	< 1,8	< 1,8	1.052
	Eficiência	59,5%	12,9%	75,0%	8,0%	4,4%	10,1%	2,4%	40,5%	1,4%	0,5%	4,8%	100,0%	100,0%	0,0%
Osmose Reversa ⁽⁴⁾	Remoção		2,84	6,67	2,36	0,36	2,01	43,83	0	43,83	0,41	7,26	< 1	< 1	53
	Eficiência		98,0%	97,7%	98,1%	99,4%	96,9%	97,6%	100,0%	97,5%	96,1%	17,6%	100,0%	100,0%	94,9%
Coagulação-Floculação ⁽⁵⁾	Remoção		34,5	20	35,95	12,34	23,61	1497	2	1495	0,76	7,31			
	Eficiência		78,8%	95,0%	58,5%	78,9%	16,1%	⁽⁶⁾	96,4%	⁽⁶⁾	93,9%	21,8%			

SE - Sem Especificação encontrada

⁽¹⁾ Considerado os valores para o tempo de contato de 20 minutos e uma concentração de carvão ativado de 0,60 gramas

⁽²⁾ Considerado os valores do Teste 02 com o tempo de 15 minutos

⁽³⁾ Considerado os valores do Teste 02

⁽⁴⁾ Considerado a média dos valores do Teste 02

⁽⁵⁾ Considerado o Teste 03 com o jarro contendo 150 ppm do coagulante Bufloc 5122 e 0,5 ppm do auxiliar de coagulação Bufloc 565

⁽⁶⁾ Não houve eficiência na remoção do parâmetro

Legenda:

Sem padrão estabelecido
 Atende à diretriz de reúso
 Não atende à diretriz de reúso
 Parâmetro não avaliado

QUADRO 4.21 – COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO AVANÇADO EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO DE REÚSO PARA TORRES DE RESFRIAMENTO

Tecnologia	Resultado do tratamento	Parâmetros e seus requisitos para reúso													
		DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Cor (Hazen)	CT (mg/L)	COT (mg/L)	CI (mg/L)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	Turbidez (NTU)	pH	CT _M (NMP/100ml)	CF (NMP/100ml)	Condutividade (µ.S/cm)
		≤ 30	≤ 75	SE	SE	SE	SE	≤ 530	≤ 30	≤ 500	≤ 3	6 - 9	SE	≤ 200	800-1200
Carvão Ativado ⁽¹⁾	Remoção		4,78	< 2,5	9,38	2,51	6,87				0,71	9,43	< 1	< 1	
	Eficiência		96,2%	99,4%	72,5%	91,3%	⁽⁶⁾				90,4%	⁽⁶⁾	0,0%	0,0%	
Ozônio ⁽²⁾	Remoção		46	26	56,34	16,88	39,46	1392	7	1385	2,29	8,23	< 1	< 1	
	Eficiência		24,1%	74,5%	6,0%	17,0%	0,3%	⁽⁶⁾	46,0%	⁽⁶⁾	45,6%	5,5%	100,0%	100,0%	
Dióxido de Cloro ⁽³⁾	Remoção	12,22	124,37	40	116	44,34	71,63	1.675	25	1.650	5,76	7,61	< 1,8	< 1,8	1.052
	Eficiência	59,5%	12,9%	75,0%	8,0%	4,4%	10,1%	2,4%	40,5%	1,4%	0,5%	4,8%	100,0%	100,0%	0,0%
Osmose Reversa ⁽⁴⁾	Remoção		2,84	6,67	2,36	0,36	2,01	43,83	0	43,83	0,41	7,26	< 1	< 1	53
	Eficiência		98,0%	97,7%	98,1%	99,4%	96,9%	97,6%	100,0%	97,5%	96,1%	17,6%	100,0%	100,0%	94,9%
Coagulação-Floculação ⁽⁵⁾	Remoção		34,5	20	35,95	12,34	23,61	1497	2	1495	0,76	7,31			
	Eficiência		78,8%	95,0%	58,5%	78,9%	16,1%	⁽⁶⁾	96,4%	⁽⁶⁾	93,9%	21,8%			

SE - Sem Especificação encontrada

⁽¹⁾ Considerado os valores para o tempo de contato de 20 minutos e uma concentração de carvão ativado de 0,60 gramas

⁽²⁾ Considerado os valores do Teste 02 com o tempo de 15 minutos

⁽³⁾ Considerado os valores do Teste 02

⁽⁴⁾ Considerado a média dos valores do Teste 02

⁽⁵⁾ Considerado o Teste 03 com o jarro contendo 150 ppm do coagulante Bufloc 5122 e 0,5 ppm do auxiliar de coagulação Bufloc 565

⁽⁶⁾ Não houve eficiência na remoção do parâmetro

Legenda:

 Sem padrão estabelecido

 Atende à diretriz de reúso

 Não atende à diretriz de reúso

 Parâmetro não avaliado

QUADRO 4.22 – COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO AVANÇADO EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO DE REÚSO PARA LAVAGEM DE PISOS E IRRIGAÇÃO DE ÁREAS VERDES INDUSTRIAIS

Tecnologia	Resultado do tratamento	Parâmetros e seus requisitos para reúso													
		DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Cor (Hazen)	CT (mg/L)	COT (mg/L)	CI (mg/L)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	Turbidez (NTU)	pH	CT _M (NMP/100ml)	CF (NMP/100ml)	Condutividade (µ.S/cm)
		≤ 10	≤ 25	≤ 15	SE	SE	SE	SE	SE	≤ 1000	≤ 2	6 - 9	SE	Ausente	SE
Carvão Ativado ⁽¹⁾	Remoção		4,78	< 2,5	9,38	2,51	6,87				0,71	9,43	< 1	< 1	
	Eficiência		96,2%	99,4%	72,5%	91,3%	⁽⁶⁾				90,4%	⁽⁶⁾	0,0%	0,0%	
Ozônio ⁽²⁾	Remoção		46	26	56,34	16,88	39,46	1392	7	1385	2,29	8,23	< 1	< 1	
	Eficiência		24,1%	74,5%	6,0%	17,0%	0,3%	⁽⁶⁾	46,0%	⁽⁶⁾	45,6%	5,5%	100,0%	100,0%	
Dióxido de Cloro ⁽³⁾	Remoção	12,22	124,37	40	116	44,34	71,63	1.675	25	1.650	5,76	7,61	< 1,8	< 1,8	1.052
	Eficiência	59,5%	12,9%	75,0%	8,0%	4,4%	10,1%	2,4%	40,5%	1,4%	0,5%	4,8%	100,0%	100,0%	0,0%
Osmose Reversa ⁽⁴⁾	Remoção		2,84	6,67	2,36	0,36	2,01	43,83	0	43,83	0,41	7,26	< 1	< 1	53
	Eficiência		98,0%	97,7%	98,1%	99,4%	96,9%	97,6%	100,0%	97,5%	96,1%	17,6%	100,0%	100,0%	94,9%
Coagulação-Floculação ⁽⁵⁾	Remoção		34,5	20	35,95	12,34	23,61	1497	2	1495	0,76	7,31			
	Eficiência		78,8%	95,0%	58,5%	78,9%	16,1%	⁽⁶⁾	96,4%	⁽⁶⁾	93,9%	21,8%			

SE - Sem Especificação encontrada

⁽¹⁾ Considerado os valores para o tempo de contato de 20 minutos e uma concentração de carvão ativado de 0,60 gramas

⁽²⁾ Considerado os valores do Teste 02 com o tempo de 15 minutos

⁽³⁾ Considerado os valores do Teste 02

⁽⁴⁾ Considerado a média dos valores do Teste 02

⁽⁵⁾ Considerado o Teste 03 com o jarro contendo 150 ppm do coagulante Bufloc 5122 e 0,5 ppm do auxiliar de coagulação Bufloc 565

⁽⁶⁾ Não houve eficiência na remoção do parâmetro

Legenda:

 Sem padrão estabelecido

 Atende à diretriz de reúso

 Não atende à diretriz de reúso

 Parâmetro não avaliado

QUADRO 4.23 – COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO AVANÇADO EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO DE REÚSO PARA DESCARGA SANITÁRIA

Tecnologia	Resultado do tratamento	Parâmetros e seus requisitos para reúso													
		DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Cor (Hazen)	CT (mg/L)	COT (mg/L)	CI (mg/L)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	Turbi- dez (NTU)	pH	CT _M (NMP/100ml)	CF (NMP/100ml)	Conduti- vidade (µ.S/cm)
		≤ 10	≤ 25	≤ 15	SE	SE	SE	SE	SE	≤ 1000	≤ 2	6 - 9	SE	Ausente	SE
Carvão Ativado ⁽¹⁾	Remoção		4,78	< 2,5	9,38	2,51	6,87				0,71	9,43	< 1	< 1	
	Eficiência		96,2%	99,4%	72,5%	91,3%	⁽⁶⁾				90,4%	⁽⁶⁾	0,0%	0,0%	
Ozônio ⁽²⁾	Remoção		46	26	56,34	16,88	39,46	1392	7	1385	2,29	8,23	< 1	< 1	
	Eficiência		24,1%	74,5%	6,0%	17,0%	0,3%	⁽⁶⁾	46,0%	⁽⁶⁾	45,6%	5,5%	100,0%	100,0%	
Dióxido de Cloro ⁽³⁾	Remoção	12,22	124,37	40	116	44,34	71,63	1.675	25	1.650	5,76	7,61	< 1,8	< 1,8	1.052
	Eficiência	59,5%	12,9%	75,0%	8,0%	4,4%	10,1%	2,4%	40,5%	1,4%	0,5%	4,8%	100,0%	100,0%	0,0%
Osmose Reversa ⁽⁴⁾	Remoção		2,84	6,67	2,36	0,36	2,01	43,83	0	43,83	0,41	7,26	< 1	< 1	53
	Eficiência		98,0%	97,7%	98,1%	99,4%	96,9%	97,6%	100,0%	97,5%	96,1%	17,6%	100,0%	100,0%	94,9%
Coagulação-Floculação ⁽⁵⁾	Remoção		34,5	20	35,95	12,34	23,61	1497	2	1495	0,76	7,31			
	Eficiência		78,8%	95,0%	58,5%	78,9%	16,1%	⁽⁶⁾	96,4%	⁽⁶⁾	93,9%	21,8%			

SE - Sem Especificação encontrada

⁽¹⁾ Considerado os valores para o tempo de contato de 20 minutos e uma concentração de carvão ativado de 0,60 gramas

⁽²⁾ Considerado os valores do Teste 02 com o tempo de 15 minutos

⁽³⁾ Considerado os valores do Teste 02

⁽⁴⁾ Considerado a média dos valores do Teste 02

⁽⁵⁾ Considerado o Teste 03 com o jarro contendo 150 ppm do coagulante Bufloc 5122 e 0,5 ppm do auxiliar de coagulação Bufloc 565

⁽⁶⁾ Não houve eficiência na remoção do parâmetro

Legenda:

 Sem padrão estabelecido

 Atende à diretriz de reúso

 Não atende à diretriz de reúso

 Parâmetro não avaliado

4.4. AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DIRETOS DAS TECNOLOGIAS

Considerando a metodologia citada na seção 3.2.3, foi estimado o custo para as cinco tecnologias testadas no estudo subdividindo os valores em quatro itens que englobam: (1) custo do capital fixo necessário para implantar a tecnologia de reúso, considerando sua depreciação em dez anos; (2) o custo de manutenção do sistema; (3) o custo de operação da estação, e; (4) o custo energético do sistema de tratamento. De posse das quantidades e valores em moeda nacional, converteu-se o custo de cada item para o valor em Dólar americano, que no momento possuía cotação em relação ao Real de R\$ 2,14.

No caso do carvão ativado, foi considerado o tratamento através de dois filtros em paralelo com capacidade para 1.160 litros, sendo um deles ficando em *stand-by*. A proposta do tratamento é, com o tempo de contato de 20 minutos, manter a DQO em torno de 10 mg/L conforme memorial de cálculo apresentado no Anexo B. Esta concentração viabiliza o reúso no tanque E-coat do processo de pintura e conseqüentemente nos demais locais propostos, se necessário. No entanto, estas afirmações necessitariam ser confirmadas com um teste em coluna piloto de carvão ativado. O sistema trabalharia 24 horas por dia e sua eficiência anual seria de 94%, ou seja, 343 dias em operação. Segundo PETERS e TIMMERHAUS (1991), a eficiência anual para instalações indústrias com estas características varia entre 92 e 94%.

Nesta configuração o custo estimado do tratamento do efluente para reúso utilizando adsorção em carvão ativado ficou em US\$ 1,14/m³, como pode ser observado no Quadro 4.24. Este valor é um pouco inferior ao sugerido por RICHARD (1998, citado por ASANO, 1998) que ficou em torno de US\$ 1,36/m³ para uma estação com vazão de 44 L/s (158,4 m³/h). Deve-se salientar que nos cálculos deste estudo, não foram considerados os custos de infra-estrutura citados no item 3.2.3. Possivelmente, com estes custos inclusos, o valor aumentaria, podendo se aproximar do custo previsto por RICHARD, uma vez que a estação proposta neste estudo possui vazão muito inferior, na ordem de 0,69 L/s (2,5 m³/h).

QUADRO 4.24 – PLANILHA DE CUSTOS PARA TRATAMENTO POR CARVÃO ATIVADO

Pos.	Descrição	Unid.	Quant.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo Total (US\$)
1	TRATAMENTO POR CARVÃO ATIVADO⁽¹⁾					
1.1	Capital Fixo					
1.1.1	Filtro de carvão ativado para 1.160 L ⁽²⁾	un.	2	12.500	25.000	11.682
1.1.2	Bomba Centrífuga AISI 304 (10mca)	un.	1	3.100	3.100	1.449
1.1.3	Bomba Centrífuga p/ retrolavagem AISI 304 (5mca)	un.	1	2.500	2.500	1.168
1.1.4	Quadro de Distribuição Elétrica	un.	1	5.000	5.000	2.336
1.1.5	Instalações elétricas	un.	1	4.000	4.000	1.869
1.1.6	Carga inicial carvão ativado 12x25mm (1.160 litros por filtro)	L	2.320	2,75	6.380	2.981
1.1.7	Carga inicial areia grossa 1,7x3,2mm (20 litros por filtro)	L	40	0,75	30	14
T	TOTAL CAPITAL FIXO				46.010	21.500
D	Depreciação do capital em 10 anos		ano	10	46.010	4.601
1.2	Custo de manutenção⁽³⁾					
1.2.1	Fator de Manutenção bombas e acessórios (sobre capital fixo)	%/ano	4,0%	46.010	1.840	860
1.2.2	Fator de Manutenção da tubulação (sobre capital fixo)	%/ano	2,0%	46.010	920	430
1.3	Custo Operação + Insumos					
1.3.1	1 operador para controle da estação de reúso (Salário R\$ 700,00/mês x 12 meses x 105% de encargos sociais)	%/ano	20%	17.220	3.444	1.609
1.3.2	Areia grossa - 20L por filtro (1 troca/ano x 2 filtros) ⁽⁴⁾	L	40	0,75	30	14
1.3.3	Carvão ativado - 1.160L por filtro (12 trocas/ano) ⁽⁴⁾	L	13.920	2,75	38.280	17.888
1.4	Custo da Energia (R\$ 0,23903/kWh)⁽⁵⁾					
1.4.2	Bomba Centrífuga (563 Watts) 23horas/dia	kWh/ano	4.442	0,23903	1.062	496
1.4.2	Bomba centrífuga retrolavagem (373 Watts) 1horas/dia	kWh/ano	128	0,23903	31	14
T	TOTAL CUSTOS SECUNDÁRIOS/ANO				45.607	21.312
D+T	TOTAL DO CUSTO DO TRATAMENTO DE C.A./ANO				50.208	23.462
	Volume anual de efluente gerado (2,5 m3/h * 24h * 343 dias/ano)⁽⁶⁾			m3/ano	20.580	
CCA	Custo do tratamento com carvão ativado por m3 de efluente				2,44	1,14

⁽¹⁾ FONTE: Valor retirado da composição de custo fornecida pela empresa ENVIRONQUIP (2006)

⁽²⁾ FONTE: Quantidade calculada conforme memorial de cálculo apresentado no Anexo C

⁽³⁾ FONTE: PETERS e TIMMERHAUS (1991)

⁽⁴⁾ FONTE: Custos fornecidos por GOLIN (2006)

⁽⁵⁾ FONTE: Valor calculado conforme Quadro E.1 do Anexo E

⁽⁶⁾ Considerado uma eficiência anual de funcionamento de 94%, ou seja, 343 dias trabalhados no ano.

Para o carvão ativado, também foi calculado o custo do tratamento considerando a máxima adsorção da DQO pelo carvão, conforme memorial de

cálculo apresentado no Anexo C. Nesta configuração seriam necessários dois filtros em paralelo com capacidade para 2.250 litros e a DQO seria reduzida para valores um pouco abaixo de 5 mg/L. Para reduzir de 10 mg/L para 5 mg/L o custo estimado do tratamento aumentou mais de 80% ficando em US\$ 2,07/m³, como pode ser observado no Quadro C.1 do Anexo C.

Para a oxidação com ozônio foi considerado um gerador que utiliza o ar como matéria prima para geração do ozônio. Segundo RAMBOR (2006), gerente da empresa que forneceu o laboratório para os testes de oxidação, um consumo de 2,5 mg/L de ozônio encontrado para o efluente filtrado não justifica o uso de gerador que utiliza oxigênio na geração. Para a filtração do efluente tratado foi proposto dois filtros de polipropileno de 5 µm similares aos utilizados no tratamento por osmose reversa. Neste caso o sistema também trabalharia 24 horas por dia e com a eficiência anual de 94%. Com esta configuração o custo estimado do tratamento do efluente para reúso através de oxidação por O₃ ficou em US\$ 0,54/m³, como pode ser observado no Quadro 4.25.

No caso da oxidação com ClO₂ estava previsto apresentar o custo para instalação de um gerador que utiliza Purate[®] e ácido sulfúrico, porém o custo do investimento se tornou proibitivo para esta configuração, na faixa de US\$ 1,49/m³ como pode ser observado no Quadro D.1 do Anexo D. Este custo elevado é devido a empresa não possuir geradores pequenos para atender a configuração com baixa vazão (2,5 m³/h) e baixo consumo de ClO₂ (5 mg/L) (ZAREMBA, 2006). Então foi considerado um gerador que utiliza o clorito de sódio e ácido clorídrico como matéria prima para geração ClO₂ para atender a realidade de consumo do estudo de caso. A configuração do sistema também previu um tanque de contato de 60 minutos e demais acessórios e instrumentação básica.

QUADRO 4.25 – PLANILHA DE CUSTOS PARA TRATAMENTO POR OZONIZAÇÃO

Pos.	Descrição	Unid.	Quant.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo Total (US\$)
1	TRATAMENTO POR OZONIZAÇÃO⁽¹⁾					
1.1	Capital Fixo					
1.1.1	Gerador de Ozônio, Concentrador de Oxigênio e Bomba com vazão de 4m ³ /h (MAT + M.O.)	un.	1	18.230	18.230	8.519
1.1.2	Reator para tempo de residência de 15 minutos (MAT + M.O.)	un.	1	50.000	50.000	23.364
1.1.3	Tubulação e acessórios	un.	1	2.000	2.000	935
1.1.4	Filtro Polipropileno 5 um com cartuchos	un.	2	1.165	2.330	1.089
1.1.5	Quadro de Distribuição Elétrica	un.	1	4.000	4.000	1.869
1.1.6	Instalações elétricas	un.	1	2.500	2.500	1.168
T	TOTAL CAPITAL FIXO				79.060	36.944
D	Depreciação do capital em 10 anos		ano	10	79.060	7.906
1.2	Custo de manutenção⁽²⁾					
1.2.1	Fator de Manutenção bombas e acessórios (sobre capital fixo)	%/ano	4,0%	79.060	3.162	1.478
1.2.2	Fator de Manutenção da tubulação (sobre capital fixo)	%/ano	2,0%	79.060	1.581	739
1.2.3	Fator de Manutenção do(s) Tanques e/ou Reservatórios (sobre capital fixo)	%/ano	2,0%	79.060	1.581	739
1.3	Custo Operação + Insumos					
1.3.1	1 operador para controle da estação de reuso (Salário R\$ 700,00/mês x 12 meses x 105% de encargos sociais)	%/ano	20%	17.220	3.444	1.609
1.3.2	Filtro Polipropileno 5 um - 2pç (12 trocas/ano)	un.	24,0	165,00	3.960	1.850
1.3.3	Ventiladores (3 unidades) (20.000 h)	un.	3,0	50,00	150	70
1.3.4	Pastilha secadora (2,5kg) (1troca/ano)	un.	1,0	160,00	160	75
1.4	Custo da Energia (R\$ 0,23903/kWh)⁽³⁾					
1.4.1	Gerador de ozônio (630 Watts) 24horas/dia	kWh/ano	5.186	0,23903	1.240	579
1.4.2	Bomba Centrífuga (373 Watts) 24horas/dia	kWh/ano	3.071	0,23903	734	343
T	TOTAL CUSTOS SECUNDÁRIOS/ANO				16.012	7.482
D+T	TOTAL DO CUSTO DO TRATAMENTO DE OZ./ANO				23.918	11.177
	Volume anual de efluente gerado (2,5m³/h * 24h * 343 dias/ano)⁽⁴⁾			m3/ano	20.580	
COZ	Custo do tratamento com Ozonização por m3 de efluente				1,16	0,54

⁽¹⁾ FONTE: Valores retirados do orçamento da empresa ECOZON (2006)

⁽²⁾ FONTE: PETERS e TIMMERHAUS (1991)

⁽³⁾ FONTE: Valor calculado conforme Quadro E.1 do Anexo E

⁽⁴⁾ Considerado uma eficiência anual de funcionamento de 94%, ou seja, 343 dias trabalhados no ano.

Para a filtração do efluente tratado foi proposto um sistema idêntico ao utilizado no tratamento por ozonização. A estação de tratamento também trabalharia 24 horas por dia e com a eficiência anual de 94%. Com esta configuração o custo

estimado do tratamento do efluente para reúso através de oxidação por ClO₂ ficou em US\$ 0,71/m³, como pode ser observado no Quadro 4.26.

QUADRO 4.26 – PLANILHA DE CUSTOS PARA TRATAMENTO POR DIÓXIDO DE CLORO

Pos.	Descrição	Unid.	Quant.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo Total (US\$)
1	TRATAMENTO POR DIÓXIDO DE CLORO⁽¹⁾					
1.1	Capital Fixo					
1.1.1	Gerador de ClO ₂ (MAT+ M.O.)	un.	1	53.000	53.000	24.766
1.1.2	Equipamentos secundários (Tanques e bombas)	un.	1	18.000	18.000	8.411
1.1.3	Tubulação e acessórios	un.	1	2.500	2.500	1.168
1.1.4	Filtro Polipropileno 5 um com cartuchos	un.	2	1.165	2.330	1.089
1.1.5	Quadro de Distribuição Elétrica	un.	1	4.000	4.000	1.869
1.1.6	Instalação elétrica	un.	1	3.000	3.000	1.402
1.1.7	Instrumentação	un.	1	2.000	2.000	935
T	TOTAL CAPITAL FIXO				84.830	39.640
D	Depreciação do capital em 10 anos		ano	10	84.830	8.483
1.2	Custo de manutenção⁽²⁾					
1.2.1	Fator de Manutenção bombas e acessórios (sobre capital fixo)	%/ano	4,0%	84.830	3.393	1.586
1.2.2	Fator de Manutenção da tubulação (sobre capital fixo)	%/ano	2,0%	84.830	1.697	793
1.2.3	Fator de Manutenção do(s) Tanque e/ou Reservatórios (sobre capital fixo)	%/ano	2,0%	84.830	1.697	793
1.3	Custo Operação + Insumos					
1.3.1	1 operador para controle da estação de reúso (Salário R\$ 700,00/mês x 12 meses x 105% de encargos sociais)	%/ano	20%	17.220	3.444	1.609
1.3.2	Clorito de Sódio 7,5% (2.700 kg/ano)	kg	2.700	2,42	6.534	3.053
1.3.3	Ácido Clorídrico 9% (2.592 kg/ano)	kg	2.592	0,55	1.426	666
1.3.3	Filtro Polipropileno 5 um - 2pç (12 trocas/ano)	un.	24,0	165,00	3.960	1.850
1.4	Custo da Energia (R\$ 0,23903/kWh)⁽³⁾					
1.4.1	Bomba centrífuga para circulação - (250 Watts) - 24 horas/dia	kWh/ano	2.058	0,23903	492	230
1.4.2	Gerador de ClO ₂ - (62 Watts) - 24horas/dia	kWh/ano	511	0,23903	122	57
T	TOTAL CUSTOS SECUNDÁRIOS/ANO				22.764	10.637
D+T	TOTAL DO CUSTO DO TRATAMENTO DE ClO₂/ANO				31.247	14.601
	Volume anual de efluente gerado (2,5m³/h * 24h * 343 dias/ano)⁽⁴⁾			m³/ano	20.580	
CDC	Custo do tratamento com dióxido de cloro por m³ de efluente				1,52	0,71

⁽¹⁾ FONTE: Valores retirados do orçamento da empresa PROMINENT (2006)

⁽²⁾ FONTE: PETERS e TIMMERHAUS (1991)

⁽³⁾ FONTE: Valor calculado conforme Quadro E.1 do Anexo E

⁽⁴⁾ Considerado uma eficiência anual de funcionamento de 94%, ou seja, 343 dias trabalhados no ano.

Para a filtração por osmose reversa foi proposto um sistema de tratamento dividido entre um pré-tratamento e a unidade de osmose reversa propriamente dita. O pré-tratamento é composto por um sistema de pressurização, um dosador de antincrustante, filtro de areia, filtro de carvão e filtro abrandador automáticos. A unidade de osmose reversa é projetada para uma vazão de permeado de 2,5 m³/h com fator de recuperação de 70%, ou seja, a vazão de rejeito está estimada em 1,1 m³/h. A unidade é composta de bomba de alta pressão, sistema de permeação com doze membranas, dois filtros cartuchos de polipropileno de 5 µm, sistema de limpeza química, quadro comando e acessórios como pressostatos, manômetros medidores de vazão e alarmes.

O regime de trabalho do sistema também seria de 24 horas por dia sendo feita a limpeza química das membranas a cada dois dias. A eficiência anual prevista também é de 94%. Com esta configuração o custo estimado do tratamento do efluente para reúso através de filtração por osmose reversa ficou em US\$ 1,70/m³, como pode ser observado no Quadro 4.27. Este valor está muito próximo ao sugerido por RICHARD (1998, citado por ASANO, 1998) que ficou em torno de US\$ 1,79/m³ para uma estação de reúso com vazão de 44 L/s (158,4m³/h) e que utiliza a calagem seguida de osmose reversa.

Para este estudo, como para os demais realizados neste trabalho, não foram considerados os custos de infra-estrutura. Neste caso em específico, também não foram computados os custos do tratamento ou disposição do rejeito da filtração. Desta forma, se computados estes custos anuais e o valor de US\$ 1,70/m³ de efluente tratado aumentaria, podendo ultrapassar o custo previsto no estudo de RICHARD (*opus cit.*).

Para o tratamento por coagulação-floculação foi considerada uma ETA com capacidade para 5,0 m³/h. Segundo ROMANELLI (2006), ETA's destinadas à reúso devem ser dimensionadas com o dobro da vazão de projeto para proporcionarem o tratamento do efluente com segurança. A configuração do sistema de tratamento é composta da seguinte forma: três tanques de preparo de soluções; canal de mistura rápida (medidor de vazão); camada de floculação; câmara de decantação; câmara de filtração, e; equipamentos como agitadores e floculadores mecânicos; bombas de

alimentação e retrolavagem; bomba dosadora e válvulas pneumáticas para retirada de lodo.

QUADRO 4.27 – PLANILHA DE CUSTOS PARA TRATAMENTO POR OSMOSE REVERSA

Pos.	Descrição	Unid.	Quant.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo Total (US\$)
1	TRATAMENTO POR OSMOSE REVERSA⁽¹⁾					
1.1	Capital Fixo					
1.1.1	Osmose Reversa ROI 0250124 (MAT + M.O.) Bombas e acessórios inclusos	un.	1	45.300	45.300	21.168
1.1.2	Sistema de Pré-tratamento (MAT + M.O.) Bombas e acessórios inclusos	un.	1	31.200	31.200	14.579
T	TOTAL CAPITAL FIXO				76.500	35.748
D	Depreciação do capital em 10 anos		ano	10	76.500	7.650
1.2	Custo de manutenção⁽²⁾					
1.2.1	Fator de Manutenção bombas e acessórios (sobre capital fixo)	%/ano	4,0%	76.500	3.060	1.430
1.2.2	Fator de Manutenção da tubulação (sobre capital fixo)	%/ano	2,0%	76.500	1.530	715
1.3	Custo Operação + Insumos					
1.3.1	1 operador para controle da estação de reúso (Salário R\$ 700,00/mês x 12 meses x 105% de encargos sociais)	%/ano	50%	17.220	8.610	4.023
1.3.2	Filtro de areia - 180L (1 troca/ano)	L	180,0	2,20	396	185
1.3.3	Carvão - 225L (2 trocas/ano)	L	450,0	5,00	2.250	1.051
1.3.4	Resina Catiônica - 225L (1 troca/ ano)	L	225,0	10,00	2.250	1.051
1.3.5	Filtro Polipropileno 5 μ m - 2pç (12 trocas/ano)	un.	24,0	165,00	3.960	1.850
1.3.6	Membranas de Osmose Reversa - 12pç (2 trocas/ano)	un.	24,0	1.488,00	35.712	16.688
1.4	Custo da Energia (R\$ 0,23903/kWh)⁽³⁾					
1.4.1	Bomba dosadora (250 Watts) 24horas/dia	kWh/ano	2.058	0,23903	492	230
1.4.2	Bomba centrífuga 220/380V (2,23kW x 2 bombas) - 24horas/dia	kWh/ano	36.714	0,23903	8.776	4.101
1.4.3	Bomba centrífuga para limpeza química (556 Watts) – 1 horas/dia	kWh/ano	191	0,23903	46	21
T	TOTAL CUSTOS SECUNDÁRIOS/ANO				67.081	31.346
D+T	TOTAL DO CUSTO DO TRATAMENTO DE O. R./ANO				74.731	34.921
	Volume anual de efluente gerado (2,5m³/h * 24h * 343 dias/ano)⁽⁴⁾			m³/ano	20.580	
COR	Custo do tratamento com Osmose Reversa por m³ de efluente				3,63	1,70

⁽¹⁾ FONTE: Valores retirados do orçamento da empresa PERMUTION (2006)

⁽²⁾ FONTE: PETERS e TIMMERHAUS (1991)

⁽³⁾ FONTE: Valor calculado conforme Quadro E.1 do Anexo E

⁽⁴⁾ Considerado uma eficiência anual de funcionamento de 94%, ou seja, 343 dias trabalhados no ano.

Neste caso, como nos demais, o regime de trabalho do sistema também seria de 24 horas por dia e com a eficiência anual de 94%. Para esta configuração o custo estimado do tratamento do efluente para reúso através de coagulação-floculação ficou em US\$ 1,57/m³, como pode ser observado no Quadro 4.28.

QUADRO 4.28 – PLANILHA DE CUSTOS PARA TRATAMENTO POR COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO (continua)

Pos.	Descrição	Unid.	Quant.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo Total (US\$)
1	TRATAMENTO POR COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO⁽¹⁾					
1.1	Capital Fixo					
1.1.1	Casa de Química (15m2)	m2	15	500	7.500	3.505
1.1.2	ETA de Reúso (material filtrante incluso)	un.	1	48.000	48.000	22.430
1.1.3	Montagem ETA de Reúso	un.	1	23.500	23.500	10.981
1.1.4	Bomba de recalque AISI 304 (5m3/h x 20mca)	un.	1	3.400	3.400	1.589
T	TOTAL CAPITAL FIXO				82.400	38.505
D	Depreciação do capital em 10 anos		ano	10	82.400	8.240
1.2	Custo de manutenção⁽²⁾					
1.2.1	Fator de Manutenção bombas e acessórios (sobre capital fixo)	%/ano	4,0%	82.400	3.296	1.540
1.2.2	Fator de Manutenção da tubulação (sobre capital fixo)	%/ano	2,0%	82.400	1.648	770
1.2.3	Fator de Manutenção do(s) Tanque e/ou Reservatórios (sobre capital fixo)	%/ano	2,0%	82.400	1.648	770
1.3	Custo Operação + Insumos					
1.3.1	2 operadores para controle da estação de reúso (Salário R\$ 700,00/mês x 12 meses x 105% de encargos sociais)	%/ano	100%	34.440	34.440	16.093
1.3.2	Coagulante Bufloc 5122 - 150 ppm (3.087 kg/ano) ⁽³⁾	kg	3.087	5,15	15.898	7.429
1.3.3	Floculante Bufloc 565 - 0,5 ppm (10,30 kg/ano) ⁽³⁾	kg	10,3	17,50	180	84
1.3.4	Material filtrante - Brita, Areia Grossa e Carvão Antracitoso (1/2 troca/ano)	un.	0,5	1.500,00	750	350
1.3.5	Diafragmas da bomba dosadora (1 troca/ano)	un.	1,0	100,00	100	47
1.4	Custo da Energia (R\$ 0,23903/kWh)⁽⁴⁾					
1.4.1	Agitadores mecânicos (2 x 373 Watts) - 1hora/dia	kWh/ano	256	0,23903	61	29
1.4.2	Floculador mecânicos (373 Watts) - 24horas/dia	kWh/ano	3.071	0,23903	734	343
1.4.3	Bomba de recalque 5m3/h x 20mca (750 Watts) - 24horas/dia	kWh/ano	6.174	0,23903	1.476	690
1.4.4	Bomba de retrolavagem 15m3/h x 10mca (1,12kW) - 0,5horas/dia	kWh/ano	192	0,23903	46	21

QUADRO 4.28 – PLANILHA DE CUSTOS PARA TRATAMENTO POR COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO (conclusão)

Pos.	Descrição	Unid.	Quant.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo Total (US\$)
1.4.5	Bomba Dosadora 220V (250 Watts) - 24horas/dia	kWh/ano	2.058	0,23903	492	230
T	TOTAL CUSTOS SECUNDÁRIOS/ANO				60.769	28.397
D+T	TOTAL DO CUSTO DO TRATAMENTO DE COAG-FLOC./ANO				69.009	32.247
	Volume anual de efluente gerado (2,5m³/h * 24h * 343 dias/ano) ⁽⁵⁾		m³/ano		20.580	
CCF	Custo do tratamento com coagulação-floculação por m³ de efluente				3,35	1,57

⁽¹⁾ FONTE: Valores retirados do orçamento da empresa Eta Engenharia, ROMANELLI (2006)

⁽²⁾ FONTE: PETERS e TIMMERHAUS (1991)

⁽³⁾ FONTE: Custos retirados do orçamento da empresa BUCKMANN (2006)

⁽⁴⁾ FONTE: Valor calculado conforme Quadro E.1 do Anexo E

⁽⁵⁾ Considerado uma eficiência anual de funcionamento de 94%, ou seja, 343 dias trabalhados no ano.

Comparando de forma simplificada os custos de tratamento entre as tecnologias, pode-se dizer que o menor custo obtido foi com a oxidação via ozônio (US\$ 0,54/m³), seguido pela oxidação com dióxido de cloro (US\$ 0,71/m³). Em terceiro lugar aparece o tratamento com carvão ativado (US\$ 1,14/m³), seguido pela coagulação-floculação (US\$ 1,57/m³). A osmose reversa, como era esperado, foi a tecnologia com maior custo de tratamento (US\$ 1,70/m³). No entanto, deve-se salientar que as únicas tecnologias que atenderam de forma consistente aos critérios para reúso foram a filtração com osmose reversa e a adsorção em carvão ativado.

Fazendo a comparação monetária entre as tecnologias estudadas baseada em sua composição de custos, nota-se que na maioria dos casos o percentual mais significativo da composição está relacionado aos custos dos insumos. Para o carvão ativado este percentual é de 76,33%, devido às freqüentes trocas mensais de carvão. No caso da filtração por osmose reversa este percentual é 59,64% do total, devido ao alto custo de substituição das membranas e para o dióxido de cloro este percentual é de 38,15% da composição devido ao custo dos insumos como clorito de sódio, ácido clorídrico e filtros. Já a coagulação-floculação apresentou como seu maior percentual de custo, o de operação, com 49,91%, influenciado pela necessidade de um maior número de operadores para o controle da estação. Esta tecnologia também apresentou como segundo maior percentual o custo dos insumos, com 24,53%, devido às características do coagulante e auxiliar de

coagulação usados. A ozonização acabou obtendo o menor percentual de custos de insumos dentre as tecnologias, 17,85%. Este percentual reduzido é devido à ausência de insumos para geração de ozônio, uma vez que a tecnologia utiliza o ar como matéria-prima.

Depois dos custos dos insumos e de operação, o custo da compra da estação (custo fixo depreciado em 10 anos) também figura como percentual relevante na composição de custos, como é o caso da tecnologia de ozônio que atingiu 33,06% do total. Na seqüência aparece o custo de manutenção com menor relevância, tendo como exceção a ozonização (26,45%) que necessita de uma maior manutenção em tanques e conexões devido ao alto poder de oxidação do ozônio.

O item com menor expressão na composição de custos é a energia, variando entre 1,97% para o ClO₂ e 8,25% para o ozônio. No entanto, este item tem grande influência na composição de custos da osmose reversa. Seu percentual é de 12,46%, sendo o segundo maior na composição de custos da tecnologia e está relacionado ao alto consumo de energia das bombas de alta pressão necessárias para a filtração do efluente.

A comparação completa dos itens que compõem o custo por metro cúbico tratado das tecnologias pode ser observada no Quadro 4.29.

QUADRO 4.29 – COMPARATIVO MONETÁRIO POR METRO CÚBICO DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO AVANÇADO EM RELAÇÃO À SUA COMPOSIÇÃO DE CUSTOS

Composição	Tecnologias e custos de tratamento									
	Carvão Ativado		Ozônio		Dióxido de Cloro		Osmose Reversa		Coagulação Floculação	
	US\$/m ³	%	US\$/m ³	%	US\$/m ³	%	US\$/m ³	%	US\$/m ³	%
Total do tratamento	1,14	100	0,54	100	0,71	100	1,70	100	1,57	100
Custo Fixo	0,10	9,16	0,18	33,06	0,19	27,15	0,17	10,24	0,19	11,94
Manutenção	0,06	5,49	0,14	26,45	0,15	21,72	0,11	6,14	0,15	9,55
Operação	0,08	6,85	0,08	14,39	0,08	11,01	0,20	11,52	0,79	49,91
Insumos	0,87	76,33	0,10	17,85	0,27	38,15	1,01	59,64	0,38	24,53
Energia	0,03	2,17	0,04	8,25	0,02	1,97	0,21	12,46	0,06	4,07

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. CONCLUSÕES

Com base nos objetivos propostos, na metodologia aplicada e nos resultados obtidos para os tratamentos analisados pode-se concluir que as tecnologias de adsorção com carvão ativado e filtração por osmose reversa forneceram os melhores resultados em termos de qualidade do efluente para reúso. Para o carvão ativado, todos os parâmetros, com exceção do pH estavam de acordo com as diretrizes de reúso propostas por este estudo. Porém, deve-se salientar que os parâmetros analisados para esta tecnologia, de certa forma, ficaram incompletos devido à falta de análise do trio de sólidos (ST, SST, e SDT) e da condutividade, por exemplo. Outro fator que limitou a análise dos testes com carvão foi que a remessa de efluente tratado utilizado no ensaio não apresentou contaminação por coliformes totais e fecais. Esta situação prejudicou a avaliação do desempenho do carvão em relação a estes parâmetros. No caso da osmose reversa, foi analisada uma quantidade maior de parâmetros e todos atenderam aos quatro setores de reúso sugeridos.

Em termos financeiros, o custo unitário de tratamento por adsorção em carvão ativado, que ficou em torno de US\$ 1,14/m³, é mais atrativo que o custo de US\$ 1,70/m³ apresentado pela osmose reversa. Esta diferença era esperada e pôde ser confirmada na literatura. No entanto, se for necessário a desinfecção da água de reúso proveniente do sistema com carvão ativado, teremos um aumento no custo deste tratamento.

A ozonização apresentou tratamento satisfatório apenas quando levado em consideração o teste com efluente filtrado (teste 02). Porém, a melhora nos resultados deste teste, em relação ao primeiro, foi basicamente em decorrência da filtração do efluente antes de sua oxidação. Foi possível também confirmar a tradicional eficiência da ozonização na desinfecção dos coliformes totais e fecais do efluente e também na oxidação da cor que sofreu redução. Porém os 15 minutos de contato não foram suficientes para deixar a cor nos níveis de reúso. Para a oxidação da matéria orgânica a tecnologia também não obteve boa eficiência, reduzindo de

forma tímida a DQO, COT e SST. Este panorama demonstrou a qualidade regular do efluente oxidado, e, assim inviabilizando sua aplicação na planta industrial. Deve-se citar também que a configuração escolhida para o tratamento via ozonização apresentou um custo unitário de tratamento de US\$ 0,54/m³, o menor valor dentre as tecnologias estudadas. Este valor, relativamente inferior, é devido à unidade de oxidação ser compacta e sua configuração permitir a geração de ozônio através do ar e não do O₂. Isso reduz consideravelmente os custos de operação e de insumos.

O dióxido de cloro apresentou a menor eficiência entre as tecnologias testadas. Analisando os resultados, constatou-se que houve semelhança na capacidade de remoção utilizando o dióxido quando dos testes com o efluente tratado e com o efluente tratado e filtrado. Da mesma forma que a oxidação com ozônio, o tratamento com ClO₂ também foi efetivo na remoção de coliformes totais, coliformes fecais e cor, apesar da cor não terem alcançado plenamente os níveis para reúso. A DBO e pH também reduziram, no entanto, em menores proporções. Os demais parâmetros não atenderam as diretrizes de reúso, inviabilizando assim a utilização do efluente nos locais propostos.

Em termos de custo, o tratamento com ClO₂ girou em torno de US\$ 0,71/m³, ficando cerca de 25% superior em comparação ao custo da oxidação por ozônio. Esta diferença de valor ocorre basicamente pelo custo anual de insumos como o clorito de sódio e o ácido clorídrico, necessários para geração do ClO₂.

No estudo com a coagulação-floculação os três testes apresentaram resultados satisfatórios, especialmente o teste 03 onde o coagulante e auxiliar de coagulação de mesma marca obtiveram o melhor desempenho. Para esta configuração, todos os parâmetros analisados para esta tecnologia, à exceção dos SDT, estavam aptos a atender as diretrizes de reúso em torres de resfriamento e processo de pintura. Analisando os dados, pôde-se notar uma elevação na concentração dos SDT a medida que se elevava a concentração dos auxiliares de coagulação.

No tratamento com coagulação-floculação constatou-se também seu custo superior em relação ao carvão ativado, US\$ 1,57/m³ contra US\$ 1,14/m³ e observou-se uma qualidade inferior no tratamento do primeiro. Esta distorção no custo do tratamento pode ser decorrente: (1) da baixa vazão para a ETA de reúso, que eleva

o custo por metro cúbico tratado, já que 49,91% do valor que compõe o custo é relativo ai item operação e (2) pela configuração proposta para o tratamento, utilizando polieletrólitos sintéticos que apresentam um custo superior aos coagulantes naturais ou mesmo ao sulfato de alumínio.

No âmbito da análise de custos, esta se mostrou adequada a sua finalidade, ou seja, obter uma escala de valor para as configurações propostas e comparar seus custos entre si. Porém, é evidente que estes valores não podem ser extrapolados de forma desprecavida para instalações de grande porte ou que utilizem outros tipos de insumos, como é o caso da coagulação-floculação, oxidação com dióxido de cloro e a própria ozonização, que aqui utilizou como matéria prima o ar para geração do ozônio.

5.2. RECOMENDAÇÕES

No sentido de aprimorar o trabalho apresentado, recomenda-se para estudos futuros:

1. Refazer os ensaios em batelada com carvão ativado complementando o estudo com a análise de todos os parâmetros do item 3.2.1 e com a instalação de uma unidade piloto de adsorção contendo filtro de areia ou carvão antracitoso e coluna de carvão ativado. Este procedimento proporcionará maiores informações para auxiliar no dimensionamento do sistema de adsorção com carvão e conseqüentemente no seu custo de tratamento.
2. Complementar os estudos com osmose reversa utilizando uma unidade de alta pressão que possa viabilizar a filtração em circuito fechado, ou seja, retornando o rejeito para o tanque de alimentação. Com este tipo de configuração, é possível se aproximar mais da realidade dos sistemas em escala real.
3. Utilizar combinações das tecnologias estudadas, como por exemplo: o uso da coagulação-floculação que apresentou resultados satisfatórios na remoção de matéria orgânica, cor e turbidez com o carvão ativado que poderia fazer o

“polimento” final do efluente sem elevar demasiadamente os custos com o carvão ativado.

4. Avaliar técnica e economicamente as possibilidades de tratamento ou disposição dos rejeitos provenientes dos estudos propostos como o lodo do tratamento por coagulação-floculação, o carvão contaminado com os poluentes do efluente e o concentrado resultante da filtração com osmose reversa.
5. Aperfeiçoar a avaliação econômica das tecnologias, realizando o levantamento de custos para configurações com maiores vazões, sendo assim possível a comparação com maior qualidade dos valores obtidos com o de outros estudos.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.969: **Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro, 60 p., 1997.
- AHN, K. H.; SONG CHA J. H. Y.; SONG, K. G.; YOO, H., **Application of tubular ceramic membranes for building wastewater reuse**, Proceedings IAWQ 19th International Conference: Vancouver, p. 137, 1998, citado por: METCALF & EDDY, INC, **Wastewater engineering: treatment and reuse**, 4th. ed. – New York: McGraw-Hill, 2003.
- ALMEIDA, E.; ASSALIN, M. R.; ROSA, M. A.; et al., **Tratamento de efluentes industriais por processos oxidativos na presença de ozônio**. Química Nova, v. 27, n. 5, p.818-824, 2004.
- ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA), **Microsistema de dados hidrometeorológicos - subsistema de qualidade de água**. Brasília: ANEEL, 2000.
- ANGELAKIS A. N.; ASANO, T., **The status of wastewater reuse practice in the Mediterranean basin: need for guidelines**. Water Research: Grã Bretanha, v. 33, n 10, p. 2201-2217, 1999.
- APHA-AWWA-WEF - American Public Health Association. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th ed. Washington: APHA-AWWA-WEF, 1998.
- APTEL, P., BUCKLEY, C. A., **Categories of membrane operations**, citado por: MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. **Reúso de Água**. NISAM – USP, Barueri, SP, 2003.
- ASANO, T., **Wastewater reclamation and Reuse, Water Quality Management Library**. Thecnomic Publishing Co. Inc.: Lancaster, PA v. 10, 1998.
- ASANO, T.; LEVINE A. D., **Wastewater reclamation, recycling and reuse: past present and future**. Water Science and Technology: Grã Bretanha, v. 33, n. 10-11, p. 1-14, 1996.
- ASANO, T., **Planing and implementation of water reuse projects**. Water Science and Technology: Grã Bretanha, v. 24, n. 9, p. 1-10, 1991.
- ASANO, T.; MILLS, R. A., **Planing and analysis for water reuse projects**. Journal AWWA: Denver, v. 82, n. 1, p. 38-47, 1990.

ATSDR - Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. **Dióxido de Cloro y Clorito**. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública, Atlanta, GA, 2004. Disponível em <http://www.atsdr.gov/es/> Acesso em 16/12/2005.

AWWA, **Water Reuse: Manual of Practice SM-3 Systems Management**. Washington, Water Pollution Control Federation, 1983.

AZEVEDO NETTO, J. M.; MANFRINI, C.; CAMPOS, J. R.; POVINELLI, J.; PARLATORE, A. C.; HESPANHOL, I.; ROSSIN, A. C.; YAGUINUMA, S., **Técnicas de abastecimento e tratamento de água**, 2ª ed. v.2, São Paulo, CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1979.

BASSANI, L. **Desinfecção de Efluente Sanitário por Ozônio: Parâmetros Operacionais e Avaliação Econômica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

BLUM, J. R. C., **Critérios e padrões de qualidade da água**. In: MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F., **Reúso de Água**. NISAM – USP, Barueri, SP, 2003.

BOURGEOUS, K.; TCHOBANOGLOUS, G.; DARBY, J., **Performance evaluation of the Koch ultrafiltration (UF) membrane system for wastewater reclamation**. Center of Environmental and Water Resources Engineering, Report N.º 99-2, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 1999.

BUCKMAN LABORATÓRIOS LTDA, **Programa para a estação de tratamento de efluentes**, [Mensagem pessoal], Mensagem recebida por: airton@inotec.com.br, de Buckman, em 19/10/2006.

CAFFARO, S. P. A. – GRUPO SNIA. **Chemicals Business Unit: Chlorine Dioxide Wastewater Disinfection**. Disponível em <http://www.caffarochem.com>. Acesso em novembro 2005.

CAMARGO, J. G.; **Aplicação do Dióxido de Cloro na Desinfecção de Efluentes Domésticos Tratados pelo Sistema de Lodos Ativados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

CAMP, T. R.; STEIN, P. C., **Velocity gradients and internal work in fluid motion**. Journal Boston Society of Civil Engineers, vol 30, p.209, 1946, citado por: METCALF & EDDY, INC, **Wastewater engineering: treatment and reuse**, 4th. ed. – New York: McGraw-Hill, 2003.

CHEREMISINOFF, P. N.; ELLERBUSCH, F., **Carbon adsorption handbook**. Michigan: Ann Arbor Science, 1978.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **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.** Diário Oficial da República Federal do Brasil, Brasília, 2005.

CRITTENDEN, J. P., **Personal communication**, 2000, citado por: METCALF & EDDY, INC, **Wastewater engineering: treatment and reuse**, 4th. ed. – New York: McGraw-Hill, 2003.

DEGANI, L. F. S., **Apostila do Curso de Tratamento de Águas Industriais**, Curitiba: Degani – Departamento de Divulgação Técnica, 1981.

DI BERNARDO, L., **Métodos e técnicas de tratamento**. 2 v. Rio de Janeiro: ABES, 1993.

ECKENFELDER JR, W. W., **Industrial water pollution control**. 2nd. Ed. New York: McGraw-Hill, 1989.

ECOZON, **Orçamento sistema de ozonização**, [Mensagem pessoal], Mensagem recebida por: airton@inotec.com.br, de Ecozon, em 06/11/2006.

EKA CHEMICALS DO BRASIL S.A. **Purate® - Leading ClO₂ Technology™**. Disponível em: <http://www.ekachemicals.com.br>. Acesso em 15/08/2006.

ENVIRONQUIP – ENGENHARIA DE SISTEMAS AMBIENTAIS, **PR-26460-11 – Filtro de carvão ativado**, [Mensagem pessoal], Mensagem recebida por: airton@inotec.com.br, de Environquip, em 01/11/2006.

EPA – Environmental Protection Agency. **Guidelines for Water Reuse**. EPA/625/R-04/108, Washington, DC, September, 2004.

EPA – Environmental Protection Agency. **National Primary Drinking Water Regulations; Disinfectants and Disinfection Byproducts; Proposed Rule**. Federal Register Environmental Documents: July 29, 1994. EPA 815-R-99-014. Disponível em <http://www.epa.gov/EPAWATER/1996/May/Day-14/pr-20972DIR/Other/julya.txt.html>

EPA – Environmental Protection Agency. **Manual for carbon adsorption: process design**. Washington, DC, 1973.

EXPANSUL COMÉRCIO, IMPORTAÇÃO E EXPORTAÇÃO LTDA. **Dióxido de Cloro Expansul**. Disponível em: <http://www.expansul.com.br/dioxido.htm>. Acesso em 15/12/2005.

FAURECIA BANCOS PARA AUTOMÓVEIS, **Fluxo Pintura Cataforética**. Fluxograma FLX-MET-PINTURA-001, Revisão 3, Quatro Barras, 2006.

GIORDANI, S., **Averiguações das Possibilidades de Reúso de Efluentes Domésticos Tratados nas Bacias do Alto Iguaçu e Alto Ribeira**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

GOLIN, D., **Dimencionamento de filtro e custos de carvão ativado**, [Entrevista concedida por Dirce Golin], Industrias Químicas Carbomafra, Curitiba – PR, em 14/11/2006.

GREGORY, R.; ZABEL, T. F., **Sedimentation and flotation**. In: Water quality and treatment – a handbook of community water supplies. 4.ed. New York: McGraw-Hill, 1990.

GUZEL-SEYDIM, Z. B.; GREENE, A. K.; SEYDIM, A. C., **Use of ozone in the food industry**. Lebensm.-Wiss. u.-Technol., 37 (2004) p. 453–460, 2003.

HESPANHOL, I., **Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, município e recarga de aquíferos**. In: MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F., **Reúso de Água**. NISAM – USP, Barueri, SP, 2003.

HESPANHOL, I., **Wastewater as a resource**, In. HELMER, R.; HESPANHOL, I. (Org.) Water pollution control – a guide to the use of water quality management principles: Genebra, WHO/UNEP, 1997.

HESPANHOL, I., **Guidelines and integrated measures for public health protection in agricultural reuse systems**, J. Water SRT-Aqua: England, v.39, n. 4, p. 237-249, 1990.

HIGGINS, T. E., **Hazardous waste minimization handbook**, Chelsea, Michigan: Lewis Publishers, 1989.

IDEAL S.A. TINTAS E VERNIZES, **Informativo Técnico – Electro Coating Products**, Tintas Renner, São Paulo, 1990.

ITT Industries, **Guide to Global Water Issues**. 1999. Disponível em: www.itt.com/waterbook . Acesso em 30/09/2005.

JUNLI, H.; LI, W.; NANQI, R.; FANG, M., **Disinfection Effect of Chlorine Dioxide on Bacteria in Water**. Water Research, v. 31, n. 3, p. 607-613, 1997.

KIELY, G., **Environmental Engineering**. London, Grã Bretanha: McGraw-Hill, 1996.

KOGELSCHATZ, U., **Advanced ozone generation**. In S. Stucki (Ed.), Process technologies for water treatment, New York: Plenum Publishers, pp. 87–120, 1988.

LEON, S. G.; MOSCOSO, J. C., **Tratamento e uso de águas residuárias**. Tradução de: H. R. Gheyi; A. Koning; B. S. O. Cebalos; F. A. V. Damasceno. (CEPIS), Campina Grande; UFPB, 1999. Original em espanhol.

LAVRADOR FILHO, J., **Contribuição para o entendimento do reúso planejado da água e algumas considerações sobre suas possibilidades no Brasil.** Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 1987.

LEME, F. P., **Teoria e técnicas de tratamento de água,** São Paulo: CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1979.

LORA, E. E. S., **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte.** Rio de Janeiro: Interciência 2. ed., 2002.

MACEDO FILHO, A.; BRANCO, Z. C., **Água - Tratamento e Qualidade.** USAID – Centro de Publicações Técnicas da Aliança, Rio de Janeiro, 1964.

MADAENI, S.S.; MANSOURPANAH, Y., **COD Removal from Concentrated Wastewater Using Membranes,** Filtration+Separation: ISSN 0015-1882/03, p. 40-46, July/August, 2003.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F., **Reúso de Água.** NISAM – USP, Barueri, SP, 2003.

MANCUSO, P. C. S., **Progresso na Metodologia e na Tecnologia de Recirculação de Água na Indústria.** In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE SETMA, São Paulo, 29 a 31 de agosto de 2000. Relação de trabalhos – CD-ROM, 2000.

METCALF & EDDY, INC, **Wastewater engineering: treatment and reuse,** 4th. ed. – New York: McGraw-Hill, 2003.

MIERZWA, J. C., **Água na indústria: uso racional e reúso,** São Paulo: Oficina dos Textos, 2005.

MIERZWA, J. C., **O uso racional e o reúso como ferramenta para o gerenciamento de águas e efluentes na indústria – estudo de caso da KODAK brasileira,** Tese de Doutorado – EPUSP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MONTGOMERY CONSULTING, J. M., **Water treatment principles & design,** – Nova York: John Wiley & Sons, 1985.

NALCO Chemical Company, **The Nalco water handbook,** 2^a ed., Editor: Frank N. Kemmer. New York: McGraw-Hill, 1988.

NEMEROW, N. L.; DASGUPTA, A., **Industrial and hazardous waste treatment.** New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

NRC, **Issues in Potable Reuse: The Viability of Augmenting Drinking Water Supplies with Reclaimed Water,** Washington DC: National Research Council, National Academy Press, 1998.

OEHLSCHLAEGER, H. F., **Reactions of ozone with organic compounds**, 1978, *citado por*: GUZEL-SEYDIM, Z. B., GREENE, A. K., SEYDIM, A. C., **Use of ozone in the food industry**. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.*, 37 (2004) p. 453–460, 2003.

PAWLOWSKY, U., **Reaproveitamento e Tratamento de Resíduos Industriais**, Apostila da Disciplina de Reaproveitamento e Tratamento de Resíduos Industriais - 1º versão, Curitiba: PPGREHA/UFPR, 2004.

PERMUTION E. J. KRIEGER & CIA LTDA, **Sistema de tratamento de água por osmose reversa simples passo 2,5m³/h**, [Mensagem pessoal], Mensagem recebida por: airton@inotec.com.br, de Permution, em 16/10/2006.

PETERS, M. S.; TIMMERHAUS, K. D., **Plant design and economics for chemical engineers**. 4th. ed. – New York: McGraw-Hill, 1991.

PROMINENT BRASIL LTDA. **BelloZon® - Gerador de dióxido de cloro**. Disponível em: <http://www.prominent.com.br/bello.htm>. Acesso em 15/12/2005.

PROMINENT BRASIL LTDA, **Gerador de dióxido de cloro**, [Mensagem pessoal], Mensagem recebida por: airton@inotec.com.br, de Prominent, em 16/11/2006.

RAMBOR, A., **Orçamento equipamento ozônio**, [Mensagem pessoal], Mensagem recebida por: airton@inotec.com.br, de White Martins, em 01/11/2006.

REBNUS, M.; ENGEL, G., **Reuse of wastewater for industrial cooling systems**, *Journal WPCF*: Alexandria, v. 60, n. 2, p. 237-241, 1988.

RIBEIRO, L. **Aplicação de Dióxido de Cloro como Alternativa para Desinfecção de Esgotos Sanitários Tratados Através de Lagoas de Estabilização**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

RICE, R. G., **Ozone reference guide**. Prepared for Electric Power Research Institute, Community Environment Center, St. Louis, MO, 1996, *citado por*: METCALF & EDDY, INC, **Wastewater engineering: treatment and reuse**, 4th. ed. – New York: McGraw-Hill, 2003.

RICE, R. G., **Application of ozone in water and waste water treatment**. In R. G. Rice, & M. J. Browning (Eds.), *Analytical aspects of ozone treatment of water and waste water* (pp. 7–26). Syracuse, NY: The Institute, 1986, *citado por*: GUZEL-SEYDIM, Z. B., GREENE, A. K., SEYDIM, A. C., **Use of ozone in the food industry**. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.*, 37 (2004) p. 453–460, 2003.

RICE, R. G.; ROBSON, C. M.; MILLER, G. W.; HILL, A. G., **Uses of ozone in drinking water treatment**. *Journal of the American Water Works Association*, 73(1), 44–57, 1981, *citado por*: GUZEL-SEYDIM, Z. B., GREENE, A. K., SEYDIM, A. C., **Use of ozone in the food industry**. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.*, 37 (2004) p. 453–460, 2003.

RICHARD, D., **The cost of wastewater reclamation and reuse**, citado por: ASANO, T., **Wastewater reclamation and Reuse**. Thecnomic Publishing Co. Inc.: Lancaster, PA, p.1335-95, 1998.

RICHTER, C.A.; NETTO, J.M. de A., **Tratamento de água – tecnologia atualizada**. São Paulo: Edgard Blücher, 1991.

ROMANELLI, M., **co06-100: “SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA – 5 m³/h”**, [Mensagem pessoal], Mensagem recebida por: airton@inotec.com.br, de ETA Engenharia de Tratamentos de Águas Ltda, em 15/11/2006.

SANTANA, T. S. S., **Reciclagem de água na indústria cafeeira**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

SANTOS FILHO, D. F., **Clarificação de água e remoção de alguns elementos indesejáveis**, In: Tecnologia de tratamento de água – Água para indústrias. Rio de Janeiro: Almeida Neves. p.18-27, 1976.

SIMEC – Sindicato dos Metalúrgicos da Grande Curitiba. Sr. Nilson Markoski, nilson@simec.com.br - www.simec.com.br. Contato em 23/08/2005.

SNATURAL – Tecnologias Ambientais Ltda. – **Desinfecção por ozônio**. Disponível em: <http://www.snatural.com.br/Ozonio.htm>. Acesso em 19/12/2005.

SODI SCIENTIFICA S.P.A. **Manual técnico de instalação, operação e manutenção**. Revisado, 1996.

STEPHENSON, T.; JUDD, S.; JEFFERSON, B.; BRINDLE, K., **Membrane bioreactors for wastewater treatment**. London: IWA Publishing, 2000, citado por: METCALF & EDDY, INC, **Wastewater engineering: treatment and reuse**, 4th. ed. – New York: McGraw-Hill, 2003.

TOMAZ, P., **Previsão de consumo de água**, MF – São Paulo: Navegar Editora, 2000.

U.N. - United Nation, **Relatório da Conferência Rio + 10** – Johannesburg, South Africa, 2002.

WESTERHOFF, G. P., **Un update of research needs for water reuse**, In: Water Reuse Symposium, 3, San Diego, California: Proceedings p. 1731-42, 1984.

WARD, R. W.; GIFFIN, R.; DEGRAEVE, G.; STONE, R., **Disinfection efficiency toxicity of several wastewater disinfectants**. EPA-600/2-76-156, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, 1976, citado por: METCALF & EDDY, INC, **Wastewater engineering: treatment and reuse**, 4th. ed. – New York: McGraw-Hill, 2003.

WAGNER, J., **Membrane filtration handbook practical tips and hints**. 2nd ed. Minnetonka: Osmonics Inc., 2001.

WHITE, G. C., **Handbook of chlorination and alternative disinfectants**. 4th ed., New York: Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., 1999, citado por: METCALF & EDDY, INC, **Wastewater engineering: treatment and reuse**, 4th ed. – New York: McGraw-Hill, 2003.

WHO - World Health Organization, **Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater. Vol. 2. Wastewater use in agriculture. Vol. 3. Wastewater and excreta use in aquaculture**, Genebra, Suíça: 2006.

WHO - World Health Organization, **Reuse of effluents: methods of wastewater treatment and health safeguards**, Of a WHO meeting of experts. Technical report series, Genebra: n. 517, 1973.

ZAREMBA, G., **Projeto Purate**, [Mensagem pessoal], Mensagem recebida por: airton@inotec.com.br, de Eka Chemicals, em 08/11/2006.

ANEXO A – Resultados das análises físico-químicas para determinação da concentração ótima dos coagulantes.

QUADRO A.1 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE NA DETERMINAÇÃO DA MELHOR CONCENTRAÇÃO DOS COAGULANTES

Concentração (ppm)	Parâmetros					
	DQO (mg/L)	Cor (Hazen)	Turbidez (NTU)	CT (mg/L)	COT (mg/L)	Cl (mg/L)
TESTE 01 - PE019						
0,0 (Eflu. Tratado)	163,29	400,00	12,49	86,60	58,46	28,14
100	56,45	20,00	1,02	48,58	15,59	32,99
120	48,38	20,00	0,95	45,54	15,11	30,43
140	50,40	15,00	0,78	42,50	14,04	28,45
160	44,35	20,00	0,71	41,02	12,08	28,93
180	55,66	20,00	0,68	42,71	14,48	28,23
200	56,45	10,00	0,73	39,87	12,55	27,32
TESTE 02 - SULFATO DE ALUMÍNIO PA						
0,0 (Eflu. Tratado)	163,29	400,00	12,49	86,60	58,46	28,14
40	64,19	25,00	1,53	27,32	14,72	12,60
50	62,18	30,00	1,47	27,21	14,70	12,50
60	58,17	20,00	1,43	26,22	14,07	12,15
70	66,19	20,00	1,27	24,58	12,97	11,60
80	62,18	20,00	1,40	22,11	12,70	9,41
90	50,95	20,00	1,14	23,97	12,99	10,97
100	62,18	20,00	1,58	21,98	12,97	9,08
TESTE 03 - BUFLOC 5122						
0,0 (Eflu. Tratado)	163,29	400,00	12,49	86,60	58,46	28,14
10	70,21	30,00	3,60	57,53	18,58	38,94
50	51,35	30,00	0,59	47,08	11,12	35,96
100	50,55	20,00	0,49	42,82	11,84	30,98
150	46,13	20,00	0,50	40,77	12,98	27,79
200	57,37	20,00	0,78	35,38	13,65	21,73
400	58,57	10,00	6,56	28,60	16,52	12,07
600	71,41	20,00	6,22	29,93	19,47	10,47

QUADRO A.2 – VARIAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO EFLUENTE NA DETERMINAÇÃO DA MELHOR CONCENTRAÇÃO DOS COAGULANTES

Concentração (ppm)	Parâmetros				
	Temperatura (°C)	pH	ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)
TESTE 01 - PE019					
0,0 (Eflu. Tratado)	22,50	9,35	1.484	55	1.429
100	20,00	7,65	1.562	15	1.547
120	20,00	7,95	1.577	15	1.562
144	20,00	7,92	1.558	6	1.552
160	20,00	7,46	1.576	12	1.564
180	20,00	7,60	1.577	17	1.560
200	20,00	7,29	1.583	11	1.572
TESTE 02 - SULFATO DE ALUMÍNIO PA					
0,0 (Eflu. Tratado)	22,50	9,35	1.484	55	1.429
40	23,00	7,26	1.676	10	1.666
50	23,00	7,15	1.609	8	1.601
60	23,00	7,09	1.608	11	1.597
70	23,00	7,08	1.606	9	1.597
80	23,00	6,65	1.582	23	1.559
90	23,00	6,64	1.553	13	1.540
100	23,00	6,47	1.533	21	1.512
TESTE 03 - BUFLOC 5122					
0,0 (Eflu. Tratado)	22,50	9,35	1.484	55	1.429
10	22,00	8,08	1.488	15	1.473
50	22,00	7,95	1.454	7	1.447
100	22,00	7,71	1.383	4	1.379
150	22,00	7,30	1.386	12	1.374
200	22,00	7,18	1.419	12	1.407
400	22,00	6,17	1.773	13	1.760
600	22,00	4,52	1.904	14	1.890

ANEXO B – Memorial de cálculo para dimensionamento do filtro e consumo de carvão ativado (situação real: remoção suficiente da DQO para reúso).

Cálculo do volume mínimo de carvão para o tempo de contato de 20 minutos:

$$Q_{\text{projeto}} = 2,5\text{m}^3/\text{h}, \quad T_{\text{contato}} = 20 \text{ minutos (conforme ensaios de laboratório)}$$

$$V_{\text{carvão}} = Q_{\text{projeto}} * T_{\text{contato}} \Rightarrow V_{\text{carvão}} = 2.500 \text{ L/h} * 0,3333 \text{ h}$$

$$V_{\text{carvão}} = \mathbf{833 \text{ L ou } 0,833 \text{ m}^3} \Rightarrow$$

$$\text{Em kg temos } \Rightarrow P_{\text{carvão}} = 833\text{L} * 0,5 \text{ kg/L} \Rightarrow \mathbf{P_{\text{carvão}} = 417\text{kg}}$$

Cálculo da carga de DQO para a vazão de projeto:

$$DQO = 124,99\text{mg/L}, \quad Q_{\text{projeto}} = 2,5\text{m}^3/\text{h}$$

$$C_{DQO} = DQO * Q_{\text{projeto}} \Rightarrow C_{DQO} = 124,99\text{mg DQO/L} * 2.500\text{L/h}$$

$$C_{DQO} = \mathbf{312.475\text{mg DQO/h ou } 7.499.400 \text{ mg DQO/dia}}$$

Cálculo da taxa de adsorção da DQO por grama de carvão ativado (para reúso):

$$\text{Taxa de Adsorção}_{DQO} = \frac{C_o \text{ (g)} - C_f \text{ (g)}}{\text{Massa de CA(g)}} = \frac{0,12499\text{(g)} - 0,00867\text{(g)}}{0,30\text{(g)}}$$

$$\mathbf{\text{Taxa de Adsorção}_{DQO} = 387,73 \text{ mg DQO/grama de Carvão Ativado}}$$

Cálculo da capacidade de adsorção do carvão ativado acondicionado no filtro:

$$T.A. = 387,73 \text{ mg DQO/grama de carvão} \quad P = 417 \text{ kg}$$

$$C.A. = T.A. * P \Rightarrow C.A. = 0,38773\text{g DQO/g carvão} * 417.000\text{g}$$

$$\mathbf{C.A. = 161.684 \text{ g DQO ou } 161.684.800 \text{ mg DQO}}$$

Estimativa do tempo de duração do carvão ativado acondicionado no filtro:

$$C.A. = 161.684.800 \text{ mg DQO}, \quad C_{DQO} = 7.499.400 \text{ mg DQO/dia}$$

$$T = \frac{C.A.}{C_{DQO}} = \frac{161.684.800 \text{ mg DQO}}{7.499.400 \text{ mg DQO/dia}}$$

$$\mathbf{T = 21,56 \text{ dias}}$$

Para efetuar apenas uma troca por mês do carvão ativado será necessário um filtro com o seguinte volume de carvão:

$$V_{\text{mensal}} = \frac{(30 \text{ dias} * V_{\text{carvão}})}{T} = \frac{30 \text{ dias} * 833 \text{ L}}{21,56 \text{ dias}} \Rightarrow \mathbf{V_{\text{mensal}} \approx 1.160 \text{ L}}$$

ANEXO C – Memorial de cálculo para dimensionamento do filtro e consumo de carvão ativado (situação ideal: remoção máxima de DQO).

Cálculo do volume mínimo de carvão para o tempo de contato de 20 minutos:

$$Q_{\text{projeto}} = 2,5\text{m}^3/\text{h}, \quad T_{\text{contato}} = 20 \text{ minutos (conforme ensaios de laboratório)}$$

$$V_{\text{carvão}} = Q_{\text{projeto}} * T_{\text{contato}} \Rightarrow V_{\text{carvão}} = 2.500 \text{ L/h} * 0,3333 \text{ h}$$

$$V_{\text{carvão}} = \mathbf{833 \text{ L ou } 0,833 \text{ m}^3} \Rightarrow$$

$$\text{Em kg temos } \Rightarrow P_{\text{carvão}} = 833\text{L} * 0,5 \text{ kg/L} \Rightarrow \mathbf{P_{\text{carvão}} = 417\text{kg}}$$

Cálculo da carga de DQO para a vazão de projeto:

$$DQO = 124,99\text{mg/L}, \quad Q_{\text{projeto}} = 2,5\text{m}^3/\text{h}$$

$$C_{DQO} = DQO * Q_{\text{projeto}} \Rightarrow C_{DQO} = 124,99\text{mg DQO/L} * 2.500\text{L/h}$$

$$C_{DQO} = \mathbf{312.475\text{mg DQO/h ou } 7.499.400 \text{ mg DQO/dia}}$$

Cálculo da taxa de adsorção da DQO por grama de carvão ativado (máx. remoção):

$$\text{Taxa de Adsorção}_{DQO} = \frac{C_o \text{ (g)} - C_f \text{ (g)}}{\text{Massa de CA(g)}} = \frac{0,12499\text{(g)} - 0,00478\text{(g)}}{0,60\text{(g)}}$$

Taxa de Adsorção_{DQO} = 200,35 mg DQO/grama de Carvão Ativado

Cálculo da capacidade de adsorção do carvão ativado acondicionado no filtro:

$$T.A. = 200,35 \text{ mg DQO/grama de carvão} \quad P = 417 \text{ kg}$$

$$C.A. = T.A. * P \Rightarrow C.A. = 0,20035\text{g DQO/g carvão} * 417.000\text{g}$$

$$C.A. = \mathbf{83.545 \text{ g DQO ou } 83.545.950 \text{ mg DQO}}$$

Estimativa do tempo de duração do carvão ativado acondicionado no filtro:

$$C.A. = 83.545.950 \text{ mg DQO}, \quad C_{DQO} = 7.499.400 \text{ mg DQO/dia}$$

$$T = \frac{C.A.}{C_{DQO}} = \frac{83.545.950 \text{ mg DQO}}{7.499.400 \text{ mg DQO/dia}}$$

$$T = \mathbf{11,14 \text{ dias}}$$

Para efetuar apenas uma troca por mês do carvão ativado será necessário um filtro com o seguinte volume de carvão:

$$V_{\text{mensal}} = \frac{(30 \text{ dias} * V_{\text{carvão}})}{T} = \frac{30 \text{ dias} * 833 \text{ L}}{11,14 \text{ dias}} \Rightarrow V_{\text{mensal}} \approx \mathbf{2.250 \text{ L}}$$

QUADRO C.1 – PLANILHA DE CUSTOS PARA TRATAMENTO POR CARVÃO ATIVADO CONSIDERANDO A REMOÇÃO MÁXIMA DE DQO

Pos.	Descrição	Unid.	Quant.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo Total (US\$)
1	TRATAMENTO POR CARVÃO ATIVADO⁽¹⁾					
1.1	Capital Fixo					
1.1.1	Filtro de carvão ativado para 2.250L ⁽²⁾	un.	2	24.500	49.000	22.897
1.1.2	Bomba Centrífuga AISI 304 (10mca)	un.	1	3.100	3.100	1.449
1.1.3	Bomba Centrífuga p/ retrolavagem AISI 304 (5mca)	un.	1	2.500	2.500	1.168
1.1.4	Quadro de Distribuição Elétrica	un.	1	5.000	5.000	2.336
1.1.5	Instalações elétricas	un.	1	4.000	4.000	1.869
1.1.6	Carga inicial carvão ativado 12x25mm (2.250 litros por filtro)	L	4.500	2,75	12.375	5.783
1.1.7	Carga inicial areia grossa 1,7x 3,2mm (20 litros por filtro)	L	40	0,75	30	14
T	TOTAL CAPITAL FIXO				76.005	35.516
D	Depreciação do capital em 10 anos		ano	10	76.005	7.601
1.2	Custo de manutenção⁽³⁾					
1.2.1	Fator de Manutenção bombas e acessórios (sobre capital fixo)	%/ano	4,0%	76.005	3.040	1.421
1.2.2	Fator de Manutenção da tubulação (sobre capital fixo)	%/ano	2,0%	76.005	1.520	710
1.3	Custo Operação + Insumos					
1.3.1	1 operador para controle da estação de reúso (Salário R\$ 700,00/mês x 12 meses x 105% de encargos sociais)	%/ano	20%	17.220	3.444	1.609
1.3.2	Areia grossa - 20L por filtro (1 troca/ano x 2 filtros) ⁽⁴⁾	L	40	0,75	30	14
1.3.3	Carvão ativado - 2.250L por filtro (12 trocas/ano) ⁽⁴⁾	L	27.000	2,75	74.250	34.696
1.4	Custo da Energia (R\$ 0,23903/kWh)⁽⁵⁾					
1.4.2	Bomba Centrífuga (563 Watts) 23horas/dia	kWh/ano	4.442	0,23903	1.062	496
1.4.2	Bomba centrífuga retrolavagem (373 Watts) 1horas/dia	kWh/ano	128	0,23903	31	14
T	TOTAL CUSTOS SECUNDÁRIOS/ANO				83.377	38.961
D+T	TOTAL DO CUSTO DO TRATAMENTO COM C.A./ANO				90.977	42.513
	Volume anual de efluente gerado (2,5m3/h * 24h * 343 dias/ano) ⁽⁶⁾			m3/ano	20.580	
CCA	Custo do tratamento com carvão ativado por m3 de efluente				4,42	2,07

⁽¹⁾ FONTE: Valor retirado da composição de custo fornecida pela empresa ENVIRONQUIP (2006)

⁽²⁾ FONTE: Quantidade calculada conforme memorial de cálculo apresentado no Anexo C

⁽³⁾ FONTE: PETERS e TIMMERHAUS (1991)

⁽⁴⁾ FONTE: Valores fornecidos por GOLIN (2006)

⁽⁵⁾ FONTE: Valor calculado conforme Quadro E.1 do Anexo E

⁽⁶⁾ Considerado uma eficiência anual de funcionamento de 94%, ou seja, 343 dias trabalhados no ano.

ANEXO D – Levantamento de custos para tratamento com dióxido de cloro.

QUADRO D.1 – PLANILHA DE CUSTOS PARA TRATAMENTO POR DIÓXIDO DE CLORO – OPÇÃO DE TRATAMENTO COM PURATE® + ÁCIDO SULFÚRICO

Pos.	Descrição	Unid.	Quant.	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo Total (US\$)
1	TRATAMENTO POR DIÓXIDO DE CLORO⁽¹⁾					
1.1	Capital Fixo					
1.1.1	Equipamento (Gerador)	un.	1	145.000	145.000	67.757
1.1.2	Equipamentos secundários (Tanques e bombas)	un.	1	50.000	50.000	23.364
1.1.3	Tubulação e acessórios	un.	1	12.500	12.500	5.841
1.1.4	Filtro Polipropileno 5 um com cartuchos	un.	2	1.165	2.330	1.089
1.1.5	Estrutura, Suportes e Pintura	un.	1	8.350	8.350	3.902
1.1.6	Instalação elétrica	un.	1	61.000	61.000	28.505
1.1.7	Instrumentação	un.	1	22.600	22.600	10.561
T	TOTAL CAPITAL FIXO				301.780	141.019
D	Depreciação do capital em 10 anos		ano	10	301.780	30.178
1.2	Custo de manutenção⁽²⁾					
1.2.1	Fator de Manutenção bombas e acessórios (sobre capital fixo)	%/ano	4,0%	301.780	12.071	5.641
1.2.2	Fator de Manutenção da tubulação (sobre capital fixo)	%/ano	2,0%	301.780	6.036	2.820
1.2.3	Fator de Manutenção do(s) Tanque e/ou Reservatórios (sobre capital fixo)	%/ano	2,0%	301.780	6.036	2.820
1.3	Custo Operação + Insumos					
1.3.1	1 operador para controle da estação de reúso (Salário R\$ 700,00/mês x 12 meses x 105% de encargos sociais)	%/ano	20%	17.220	3.444	1.609
1.3.2	Purate (450 kg/ano)	kg	450,0	6,35	2.858	1.335
1.3.3	Ácido Sulfúrico (595 kg/ano)	kg	595,0	0,85	506	236
1.3.4	Filtro Polipropileno 5 um - 2pç (12 trocas/ano)	un.	24,0	165,00	3.960	1.850
1.4	Custo da Energia (R\$ 0,23903/kWh)⁽³⁾					
1.4.1	Bomba centrífuga vertical, pressão 100mca, vazão 10m ³ /h, em aço inox 304 (2,23 kW) - 2 horas/dia	kWh/ano	1530	0,23903	366	171
1.4.2	Gerador de ClO ₂ - (200 Watts) - 2 horas/dia	kWh/ano	137	0,23903	33	15
T	TOTAL CUSTOS SECUNDÁRIOS/ANO				35.308	16.499
D+T	TOTAL DO CUSTO DO TRATAMENTO DE ClO₂/ANO				65.486	30.601
	Volume anual de efluente gerado (2,5m³/h * 24h * 343 dias/ano)⁽⁴⁾			m³/ano	20.580	
CDC	Custo Dióxido de cloro por m³ de efluente				3,18	1,49

⁽¹⁾ FONTE: Valores retirados do orçamento da empresa EkaChemicals, ZAREMBA (2006)

⁽²⁾ FONTE: PETERS e TIMMERHAUS (1991)

⁽³⁾ FONTE: Valor calculado conforme Quadro E.1 do Anexo E

⁽⁴⁾ Considerado uma eficiência anual de funcionamento de 94%, ou seja, 343 dias trabalhados no ano

QUADRO A.3 – LEVANTAMENTO DO CUSTO MÉDIO DA ENERGIA ELÉTRICA (KWH). VALORES EM REAIS (R\$) (conclusão)

Hora do dia	Período Horário	Mês/Período Anual											
		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
		Úmido	Úmido	Úmido	Úmido	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	Úmido
Custo médio do período (kWh)		0,17324	0,17324	0,17324	0,17324	0,18524	0,18524	0,18524	0,18524	0,18524	0,18524	0,13162	0,17324
Custo médio anual da energia (kWh)													0,18024
Impostos		ICMS 27,00%											0,04866
		PIS/COFINS 5,62%											0,01013
Custo médio anual da energia + Impostos (kWh)													0,23903

FONTE: Companhia Paranaense de Energia Elétrica – COPEL

Observação: os valores foram obtidos com base no contrato de fornecimento de energia elétrica em alta tensão à empresa. Aos valores da tarifa está somado o rateio da demanda contratada que é de R\$ 28,79/mês dentro do período de ponta e de R\$ 9,37/mês fora do período de ponta.

Orientador

Urivald Pawlowsky

Autor

Airton Oenning Junior
Rua Vereador Constante Pinto, 195, Apto 13
Bacacheri – Curitiba – PR
82.510-240
Fone/Fax: ++ 55 41 3256-8549
Celular: ++ 55 41 9622-6295
e-mail: airton.oenning.junior@gmail.com