

**OZONIZAÇÃO SEGUIDA DE  
COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E FLOTAÇÃO  
COMO PÓS-TRATAMENTO DO EFLUENTE DE  
REATOR ANAERÓBIO COM CHICANAS  
TRATANDO ESGOTO SANITÁRIO**

Eng<sup>a</sup>. Civil MARINA MAYA MARCHIORETTO



Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – área: Hidráulica e Saneamento

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali

São Carlos  
- 1999 -



Class.	TESE-EESC
Cott.	13333
Tombo	230/99

31100006989

S/S 1053649

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M317o Marchioretto, Marina Maya  
Ozonização seguida de coagulação/floculação e  
flotação como pós-tratamento do efluente de reator  
anaeróbio com chicanas tratando esgoto sanitário /  
Marina Maya Marchioretto. -- São Carlos, 1999.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de  
São Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.  
Área: Hidráulica e Saneamento.  
Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali.

1. Ozonização.
2. Flotação por ar dissolvido.
3. Pós-tratamento.
4. Efluente de reator anaeróbio.
5. Esgoto sanitário. I. Título.



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

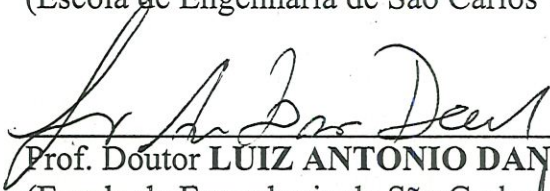
Candidata: Engenheira **MARINA MAYA MARCHIORETTO**

Dissertação defendida e aprovada em 25-06-1999  
pela Comissão Julgadora:



---

Prof. Doutor **MARCO ANTONIO PENALVA REALI (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Doutor **LUIZ ANTONIO DANIEL**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Doutor **CARLOS GOMES DA NAVE MENDES**  
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)



---

Prof. Associado **EDUARDO CLETO PIRES**  
Coordenador da Área de Hidráulica e Saneamento



---

**JOSÉ CARLOS A CINTRA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC





“ TUDO NO MUNDO ENCONTRA-SE EM UM  
ESTADO DE RELAÇÃO E EQUILÍBRIO  
COM ALGUMA OUTRA COISA;  
ÀS VEZES, COM MUITAS OUTRAS COISAS.  
NADA EXISTE SOZINHO, EM UM VÁCUO,  
SEM ESTAR CONECTADO, DE ALGUMA FORMA,  
POR MAIS SUTIL E IMPERCEPTÍVEL  
QUE SEJA ESTA LIGAÇÃO, AO INOBSERVANTE. ”

(TAO)



H  
O  
M  
E  
N  
A  
G  
E  
M

Dedico este trabalho

Aos meus pais  
Firmino & Cida,  
meus primeiros e  
verdadeiros mestres.

Ao meu mano  
Marco,  
meu eterno e  
bom companheiro.



# AGRADECIMENTOS

Ao excelente orientador e amigo,  
Professor Dr. Marco Antonio Penalva Reali,  
grande responsável por despertar em mim o gosto  
pela pesquisa, abrindo-me as primeiras portas  
de ingresso a este infinito mundo das investigações.

Ao Professor Dr. Luiz Antonio Daniel pelas inúmeras  
sugestões dadas e pela impecável atenção a mim  
despendida no decorrer deste trabalho.

Aos Professores: Dr. Luiz Di Bernardo e Dr. Woodrow  
Lopes Roma pelos indispensáveis auxílios prestados.

Aos Professores: Dr. José R. Campos e Dr. Carlos G. da  
Nave Mendes, à Margarida Marchetto e ao Rogério G.  
Penetra pelas valiosas dicas e ensinamentos.

Aos queridos técnicos do Laboratório de Saneamento,  
Júlio, Cidinha e "Seu" Paul, pela assistência e amizade.

Ao técnico Francisco Bergamim (Chico), por toda a ajuda.

Aos funcionários do Dep<sup>to</sup>. de Hidráulica e Saneamento,  
especialmente: Pavi, Sá, Cido, Rose, Edson e Valderez.

Aos funcionários da Biblioteca Central, em especial à  
Milna (Mi) e ao Donizete, pelos anos de convívio e estima.

A todos os amigos e colegas que comigo estiveram  
durante todo esse percurso, particularmente:  
Eng. Carlos Humberto Martins (Cazuza),  
Flá O<sub>3</sub>, Ricardo, Válter, Luciana,  
Silvana, Sérgio e Patty Helena.

À super amiga Arq.<sup>a</sup> Juliana Cortez Barbosa,  
toda a minha infinita afeição e admiração.

À eterna amiga Eng.<sup>a</sup> Lucia Helena Rossi por  
tantos anos de pura amizade e convivência em  
todos os momentos vividos em São Carlos.

Ao Marcus, pelo carinho e companheirismo  
e pelas ocasiões de alegria e descontração,  
essenciais para se trabalhar bem.

A toda a minha família.

À CAPES, pela bolsa de estudos fornecida.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	5
3 REVISÃO DA LITERATURA	6
3.1 Fundamentos gerais sobre a flotação por ar dissolvido	6
3.1.1 Alguns aspectos sobre curvas de flotação	8
3.1.2 O emprego da FAD no tratamento de águas residuárias	11
3.2 O reator anaeróbio com chicanas	14
3.3 Ozônio	17
3.3.1 Aspectos gerais	17
3.3.2 Produção	20
3.3.3 Propriedades químicas	21
3.3.4 Transferência	26
3.3.5 Determinação da concentração de ozônio	29
3.3.5.1 Métodos para análise de ozônio dissolvido na água	30
3.3.6 Pré-ozonização	31
3.3.6.1 Benefícios da pré-ozonização	33
3.3.7 Pós-ozonização	42
4 MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1 Considerações iniciais	43
4.2 Descrição das instalações utilizadas	47
4.2.1 Instalação de FAD em escala de laboratório (flotatestes)	47
4.2.2 Colunas de ozonização	48
4.2.3 Reator anaeróbio com chicanas	50
4.3 Ensaio preliminares à pré-ozonização	51
4.3.1 Considerações iniciais	51
4.3.2 Método para determinação do ozônio na fase gasosa	51



4.3.2.1	<i>Determinação da produção do gerador de ozônio</i>	51
4.3.3	Metodologia para determinação do ozônio na fase líquida	55
4.3.3.1	<i>Determinação do residual de ozônio</i>	55
4.4	Ensaio referente à primeira etapa do presente estudo	58
4.5	Ensaio referente à segunda etapa do presente estudo	61
4.6	Ensaio referente à terceira etapa do presente estudo	63
4.7	Ensaio referente à quarta etapa do presente estudo	65
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>69</b>
5.1	Considerações iniciais	69
5.2	Ensaio preliminar à pré-ozonização	71
5.2.1	Determinação do ozônio na fase gasosa	71
5.2.1.1	<i>Determinação da produção do gerador de ozônio</i>	71
5.2.2	Determinação do ozônio na fase líquida	73
5.2.2.1	<i>Determinação do residual de ozônio</i>	73
5.3	Resultados dos ensaios referentes à primeira etapa de estudo	75
5.3.1	Análise geral dos resultados da primeira etapa de ensaios	104
5.4	Resultados dos ensaios referentes à segunda etapa de estudo	112
5.4.1	Análise geral dos resultados da segunda etapa de ensaios	133
5.5	Resultados dos ensaios referentes à terceira etapa de estudo	145
5.6	Resultados dos ensaios referentes à quarta etapa de estudo	149
5.7	Resultados dos ensaios referentes à análise de coliformes fecais e totais	157
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>159</b>
6.1	Conclusões	159
6.2	Recomendações	161
	<b>ANEXO 1</b>	<b>162</b>
	<b>ANEXO 2</b>	<b>179</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>188</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Distribuição das velocidades de sedimentação de partículas (flocos)	8
FIGURA 1.2 – Exemplo de curva de distribuição de velocidades de flotação de partículas ou flocos (curva de flotação)	10
FIGURA 2 – Esquema do reator anaeróbio de chicanas	15
FIGURA 3 – Mecanismo de cadeia cíclica da decomposição do ozônio	22
FIGURA 4 – Reações entre o ozônio e compostos orgânicos na água	23
FIGURA 5 – Diagrama ilustrativo das etapas de estudo	46
FIGURA 6 – Unidade de flotação em escala de laboratório (flotateste)	47
FIGURA 7 – Esquema do conjunto de ozonização	49
FIGURA 8 – Primeira etapa de ensaios	60
FIGURA 9 – Segunda etapa de ensaios	62
FIGURA 10 – Terceira etapa de ensaios	64
FIGURA 11 – Quarta etapa de ensaios	66
FIGURA 12 – Resultados referentes à primeira etapa de ensaios para velocidade de flotação = 12 cm/min	76
FIGURA 13 – Curvas de flotação para turbidez referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 0 mg/L	77
FIGURA 14 – Curvas de flotação para turbidez referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 3 mg/L	78
FIGURA 15 – Curvas de flotação para turbidez referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 6 mg/L	79
FIGURA 16 – Curvas de flotação para turbidez referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 9 mg/L	80



FIGURA 17 – Curvas de flotação para cor aparente referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 0 mg/L	84
FIGURA 18 – Curvas de flotação para cor aparente referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 3 mg/L	85
FIGURA 19 – Curvas de flotação para cor aparente referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 6 mg/L	86
FIGURA 20 – Curvas de flotação para cor aparente referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 9 mg/L	87
FIGURA 21 – Curvas de flotação para DQO referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 0 mg/L	91
FIGURA 22 – Curvas de flotação para DQO referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 3 mg/L	92
FIGURA 23 – Curvas de flotação para DQO referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 6 mg/L	93
FIGURA 24 – Curvas de flotação para DQO referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 9 mg/L	94
FIGURA 25 – Curvas de flotação para P total referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 0 mg/L	98
FIGURA 26 – Curvas de flotação para P total referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 3 mg/L	99
FIGURA 27 – Curvas de flotação para P total referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 6 mg/L	100
FIGURA 28 – Curvas de flotação para P total referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 9 mg/L	101
FIGURA 29 – Valores de turbidez referentes à primeira etapa de ensaios, com pH= 5,0, 5,5, 6,5 e 7,5 e velocidade de flotação = 12 cm/min	106
FIGURA 30 – Valores de cor ap. referentes à primeira etapa de ensaios, com pH= 5,0, 5,5, 6,5 e 7,5 e velocidade de flotação = 12 cm/min	107
FIGURA 31 – Valores de DQO referentes à primeira etapa de ensaios, com pH= 5,0, 5,5, 6,5 e 7,5 e velocidade de flotação = 12 cm/min	108

FIGURA 32 – Valores de P total referentes à primeira etapa de ensaios, com pH= 5,0, 5,5, 6,5 e 7,5 e velocidade de flotação = 12 cm/min	109
FIGURA 33 – Resultados referentes à segunda etapa de ensaios para velocidade de flotação = 12 cm/min	113
FIGURA 34 – Curvas de flotação para turbidez referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 30 mg/L	114
FIGURA 35 – Curvas de flotação para turbidez referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 45 mg/L	115
FIGURA 36 – Curvas de flotação para turbidez referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 65 mg/L	116
FIGURA 37 – Curvas de flotação para cor ap. referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 30 mg/L	119
FIGURA 38 – Curvas de flotação para cor ap. referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 45 mg/L	120
FIGURA 39 – Curvas de flotação para cor ap. referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 65 mg/L	121
FIGURA 40 – Curvas de flotação para DQO referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 30 mg/L	124
FIGURA 41 – Curvas de flotação para DQO referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 45 mg/L	125
FIGURA 42 – Curvas de flotação para DQO referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 65 mg/L	126
FIGURA 43 – Curvas de flotação para P total referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 30 mg/L	129
FIGURA 44 – Curvas de flotação para P total referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 45 mg/L	130
FIGURA 45 – Curvas de flotação para P total referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 65 mg/L	131
FIGURA 46 – Resultados da segunda etapa de ensaios: turbidez remanescente	135



FIGURA 47 – Resultados da segunda etapa de ensaios: cor aparente remanescente	136
FIGURA 48 – Resultados da segunda etapa de ensaios: DQO remanescente	137
FIGURA 49 – Resultados da segunda etapa de ensaios: P total remanescente	138
FIGURA 50 – Resultados da segunda etapa de ensaios: alcalinidade	139
FIGURA 51 – Resultados dos ensaios referentes à terceira etapa de ensaios com velocidade de flotação = 12 cm/min	146
FIGURA 52 – Resultados referentes à quarta etapa de ensaios com velocidade de flotação = 12 cm/min	150
FIGURA 53 – Resultados dos ensaios referentes a coliformes totais e fecais	157
 <b>ANEXO</b>	
FIGURA 54 – Dosagem de ozônio aplicada = 0 mg/L	164
FIGURA 55 – Dosagem de ozônio aplicada = 3 mg/L	168
FIGURA 56 – Dosagem de ozônio aplicada = 6 mg/L	172
FIGURA 57 – Dosagem de ozônio aplicada = 9 mg/L	176
FIGURA 58 – Dosagem de cloreto férrico = 30 mg/L	181
FIGURA 59 – Dosagem de cloreto férrico = 45 mg/L	183
FIGURA 60 – Dosagem de cloreto férrico = 65 mg/L	185
FIGURA 61 – Dosagem de ozônio = 0 mg/L	187

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Comparação das propriedades do cloro e do ozônio	19
TABELA 2 – Resultados dos ensaios determinantes da produção do aparelho gerador de ozônio	71
TABELA 3 – Tempos de ozonização e espera referentes às dosagens de ozônio aplicadas	72
TABELA 4 – Determinação do residual de ozônio para a maior dosagem aplicada	73
TABELA 5 – Determinação do residual de ozônio correspondente ao tempo de ozonização de 30 minutos	74
TABELA 6 – Condições operacionais para todas as etapas de estudo	75



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

FAD	Flotação por ar dissolvido
R	Porcentagem de remoção de determinado parâmetro por flotação
T.A.S.	Taxa de aplicação superficial ( $m^3/m^2/dia$ )
DQO	Demanda química de oxigênio (mg/L)
DQO <sub>filtr</sub>	Demanda química de oxigênio da amostra filtrada (mg/L)
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio (mg/L)
pH	Potencial hidrogeniônico
NTK	Nitrogênio total Kjeldahl
D <sub>O<sub>3</sub></sub>	Dosagem de ozônio (mg/L)
D <sub>FeCl<sub>3</sub></sub>	Dosagem de cloreto férrico (mg/L)
V	velocidade de flotação (cm/min)
P	Produção do aparelho gerador de ozônio (mg/min)
NMP	Número mais provável

## RESUMO

MARCHIORETTO, M. M. (1999). *Ozonização seguida de coagulação/floculação e flotação como pós-tratamento do efluente de reator anaeróbio com chicanas tratando esgoto sanitário*. São Carlos, 1999. 190p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Neste trabalho são apresentados e discutidos os resultados obtidos em laboratório com o pós-tratamento do efluente de um reator anaeróbio com chicanas tratando esgoto sanitário, empregando-se ozonização seguida de coagulação e flotação por ar dissolvido. Numa primeira etapa de ensaios, a partir de dosagens pré-fixadas de ozônio (0, 3, 6, 9 (mg.L<sup>-1</sup>)), foram variadas dosagens do coagulante cloreto férrico (0, 30, 45, 65 (mg.L<sup>-1</sup>)), testando-se, para todas elas, uma série de valores de pH (entre 5 e 7,5). De posse dos resultados alcançados, uma segunda fase de ensaios foi programada, em que foram fixadas dosagens de coagulante (0, 30, 45, 65 (mg.L<sup>-1</sup>)) e, para todas elas, foram investigadas dosagens de ozônio (0, 3, 6, 9 (mg.L<sup>-1</sup>)), com quatro valores de pH cada uma (5, 5,5, 6,5 e 7,5). A terceira fase de estudos foi criada e refinada com base nos resultados dos ensaios anteriores. Foram escolhidos valores de pH (5,5) e de dosagem de ozônio que proporcionaram as melhores remoções de todos os parâmetros envolvidos, variando-se a dosagem de coagulante (0, 30, 45, 65 (mg.L<sup>-1</sup>)) e testando-se, para cada uma, duas dosagens de ozônio: a ótima (6 mg.L<sup>-1</sup>) e a nula. O mesmo se fez para o pH natural da água. No último estágio de estudos, foram repetidas as condições dos ensaios da etapa precedente, eliminando-se a dosagem nula de coagulante e realizando-se uma análise mais apurada das amostras. Considerando-se as melhores condições de coagulação/flotação (dosagem de cloreto férrico de 65 mg.L<sup>-1</sup> e pH por volta de 5,5), a aplicação de 6 mg.L<sup>-1</sup> de ozônio proporcionou significativos valores de remoção de DQO (82,2 %), DBO (79 %), fosfato total (93,4 %), cor aparente (97,6 %) e turbidez (97,2 %), demonstrando que o sistema investigado constitui-se em alternativa eficiente, capaz de promover elevado grau de pós-tratamento de esgotos sanitários.

Palavras-chave: ozonização; flotação por ar dissolvido; pós-tratamento; efluente de reator anaeróbio; esgoto sanitário.



## ABSTRACT

MARCHIORETTO, M. M. (1999). *Ozonization followed by coagulation/flocculation and flotation as post-treatment of the effluent from an anaerobic baffled reactor treating domestic sewage*. São Carlos, 1999. 190p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This present work shows and discuss the results obtained in a lab-scale unit of post-treatment of the effluent from an anaerobic baffled reactor treating domestic sewage, using ozonization followed by coagulation and dissolved air flotation. In the first part of assays, from some pre-fixed ozone dosages (0, 3, 6, 9 (mg.L<sup>-1</sup>)), the coagulant ferric chloride doses were varied (0, 30, 45, 65 (mg.L<sup>-1</sup>)), testing, for each of them, a few pH values (from 5 to 7,5). Based on reaching results, a new phase of assays was programmed, in which the coagulant doses were fixed (0, 30, 45, 65 (mg.L<sup>-1</sup>)) and, to all of them, the ozone dosages were investigated (0, 3, 6, 9 (mg.L<sup>-1</sup>)), varying four values of pH (5, 5,5, 6,5 e 7,5). The third part of studies were created and refinated based on the results of the previous assays. The pH value (5,5) and the ozone dosage which provided the best removal efficiencies of all parameters involved were chosen, varying the coagulant dose (0, 30, 45, 65 (mg.L<sup>-1</sup>)) and testing, for each of them, two ozone doses: the zero one and the optimum (6 mg.L<sup>-1</sup>). The same was done for the natural pH. In the last phase of studies, the conditions of the best assays were repeated, eliminating the zero dose of coagulant and doing better refined samples analysis. Considering the best conditions of coagulation/flotation (ferric chloride dose of 65 mg.L<sup>-1</sup> and pH around 5,5), the ozone dose application of 6 mg.L<sup>-1</sup> led to a significant level of removal efficiencies of COD (82,2 %), BOD (79 %), total phosphate (93,4 %), aparent color (97,6 %) and turbidity (97,2 %), demonstrating that the system seems to be efficient and capable to promote a high degree of domestic sewage post-treatment.

Keywords: ozonization; dissolved-air flotation; post-treatment; anaerobic reactor effluent; domestic sewage.

## 1. INTRODUÇÃO

De um modo geral, o destino final de efluentes urbanos é o encaminhamento a um corpo d'água. Em consequência desse lançamento, surge a possibilidade de virem a ser gerados certos inconvenientes, como, por exemplo, o desprendimento de maus odores, o sabor estranho na água potável, a mortandade de peixes e outros. A saúde pública pode ser ameaçada pela contaminação das águas de abastecimento, dos balneários e dos gêneros alimentícios. A cólera, a febre tifóide, a disenteria e a hepatite infecciosa podem ser disseminadas por veiculação hídrica. É possível que as águas de um rio se tornem impróprias para o uso agrícola ou industrial. A finalidade do tratamento dos despejos é manter os corpos d'água livres de prejuízos desse gênero, através do uso de tecnologias confiáveis.

O acréscimo acentuado da demanda de água, devido ao contínuo aumento populacional, tem resultado na avaliação cada vez maior do reuso da água residuária como um meio de suplemento do abastecimento de água municipal e industrial. A água residuária, quando devidamente tratada e reciclada, constitui-se opção extremamente viável como fonte de água utilizável, a qual pode reduzir a demanda acirrada de água doce. Com efeito, tal alternativa reduz o impacto no ambiente.

CAMPOS et al. (1996) divulgam que, até há pouco tempo, preponderava a concepção de que o tratamento de águas residuárias por processo físico-químico, geralmente, não teria condições de proporcionar resultados e custos capazes de competir com aqueles oferecidos pelos



processos biológicos. No entanto, segundo os autores, recentemente podem ser detectados casos, com ótimos resultados, em que se empregaram compostos como cloreto férrico, cal, polieletrólitos e outros, como complemento para o tratamento biológico. Na EESC-USP, diversos estudos abrangendo o uso desses produtos, já foram efetuados, aplicando-os diretamente nos reatores biológicos e em pós ou pré-tratamento de esgotos sanitários, podendo-se citar, dentre outros, REALI & BRAGA (1995), CAMPOS et al. (1996) e PENETRA (1998).

Por outro lado, em países de clima quente, cada vez mais se utilizam reatores anaeróbios para tratamento de esgotos sanitários, tendo em vista as vantagens associadas a tais sistemas, podendo-se destacar a baixa produção de lodo biológico, a ausência de equipamentos de aeração com conseqüente diminuição no consumo de energia e facilidade de operação. Entretanto, o efluente de reatores anaeróbios requer tratamento adicional, podendo, para tanto, serem empregados reatores biológicos ou físico-químicos. Nesta última categoria, a utilização da técnica da flotação por ar dissolvido como pós-tratamento de reatores anaeróbios tem apresentado excelentes resultados, conforme constatado pelos supracitados autores.

Anteriormente a esse tipo de aplicação, a flotação por ar dissolvido vinha sendo aplicada com sucesso em sistemas de tratamento de diversos tipos de águas residuárias e também na clarificação de determinados tipos de água para abastecimento. O processo de flotação de dispersões aquosas apresenta, como idéia básica, a separação de fases através do emprego de agentes com baixa densidade, normalmente bolhas de gás, as quais, aderindo à superfície das partículas dispersas, aumentam o empuxo sobre as mesmas, possibilitando sua separação (REALI (1991)).

Na atualidade, uma nova combinação de técnicas de oxidação através do emprego da ozonização e da flotação vem conquistando considerável espaço no campo das pesquisas, sobretudo no que se refere ao tratamento de águas com alto teor de algas, uma vez que a reação do



ozônio com as células das algas resulta numa suspensão hidrofóbica, ideal à separação líquido-líquido por flotação.

O ozônio tem sido amplamente utilizado como oxidante e desinfetante em tratamento de águas superficiais para a produção de água potável na Europa e está cada vez mais sendo aplicado como pré-oxidante nos Estados Unidos, em substituição à pré-cloração. De acordo com GLAZE (1987), o ozônio pode oxidar muitos compostos orgânicos, inorgânicos e sintéticos, danosos ou potencialmente tóxicos quando presentes nas água de abastecimento e tem sido muito utilizado em tratamento combinado com outros métodos para tratar efluentes de amplo espectro de indústrias.

O referido autor reporta que, dentre os vários benefícios da pré-ozonização, destacam-se a notável eficiência na remoção de ferro e manganês responsáveis pela ocorrência de coloração na água distribuída, a redução considerável de turbidez e cor aparente, o fato de não se deixar residuais tóxicos significativos no corpo receptor, a poderosa ação como oxidante primário e a atuação como auxiliar na coagulação-floculação, possibilitando, desta maneira, uma redução da dosagem de coagulantes químicos a serem adicionados à água a ser tratada.

Estudos a respeito do efeito da pré-ozonização sobre a geração de lodo em processos físico-químicos de estações de tratamento de efluentes têxteis também vem ganhando notoriedade. Segundo LIU & LIN (1993), a ozonização combinada com a coagulação química, seguida de sedimentação, representa uma eficiente alternativa para esse tipo de tratamento. Como exemplo, pode-se citar o trabalho de SENS et al. (1998), em que foi investigada a influência da pré-ozonização em relação à geração de lodo na coagulação química seguida de sedimentação. Com base no trabalho experimental realizado, os autores concluíram que a pré-ozonização reduz a geração de lodo em até 75 % e permite eliminar eficazmente a cor do efluente estudado.

DI MATTEO (1992) relata que, em várias estações de tratamento de água, faz-se uso da pré-ozonização e do cloreto férrico como coagulante.

Este composto, conforme a autora menciona, possui a propriedade de formar flocos mais densos e maiores que os demais coagulantes e de poder atuar numa faixa mais ampla de pH.

Assim, diante dos excelentes resultados alcançados nas recentes pesquisas, referentes à aplicação da flotação por ar dissolvido no pós-tratamento de águas residuárias, aliados às vantagens potenciais inerentes à tecnologia combinando processos físico-químicos e ozonização, torna-se necessário e promissor o estudo sobre as implicações de projeto e operação relacionados ao assunto. Portanto, para contribuir para tal entendimento, surgiu a idéia de se dar início, na EESC-USP, a investigações envolvendo o pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário, através do emprego de tratamento físico-químico constituído de ozonização, coagulação e flotação por ar dissolvido.

Vale ressaltar o caráter de pioneirismo do presente trabalho, encontrando-se o mesmo inserido em projeto maior em desenvolvimento no Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, junto ao Programa de Apoio a Núcleos de Excelência (PRONEX/97), intitulado “Desenvolvimento e Otimização de Sistemas não Convencionais de Tratamento de Águas Residuárias Constituídos de Reatores Biológicos e Físico-Químicos Dispostos em Série”.

## 2. OBJETIVO

O presente estudo teve como objetivo investigar a influência da pré-ozonização (antecedendo a mistura rápida) sobre a eficiência da flotação por ar dissolvido empregada no pós-tratamento do efluente de um reator anaeróbio com chicanas tratando esgoto sanitário.



### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1. Fundamentos gerais sobre a flotação por ar dissolvido

REALI (1991) define flotação como sendo “uma operação pela qual se consegue, num determinado sistema, a separação de partículas líquidas ou sólidas de uma fase líquida, através da introdução de pequenas bolhas de gás, normalmente o ar, as quais, aderindo à superfície das partículas aumentam seu empuxo, provocando assim, a ascensão das mesmas em direção à superfície da fase líquida, podendo então, serem devidamente coletadas”.

De acordo com HYDE et al.<sup>1</sup> apud REALI (1991), dentre as modalidades da operação, a flotação por ar dissolvido (FAD) é aquela em que as bolhas de gás são obtidas através da liberação de parcela do gás, previamente dissolvido na massa líquida, devido a um subsequente abaixamento da pressão a que está submetido este líquido. Desta forma, consegue-se a geração de bolhas sem a utilização de agitação violenta.

Ainda segundo os referidos autores, a FAD adquiriu duas denominações, conforme a maneira como é promovida a diminuição da pressão:

- ① Flotação a vácuo: o ar dissolvido na água sob pressão atmosférica é liberado pela redução da pressão superficial. Esse tipo de flotação tem sido muito usado na indústria de polpa e papel para recuperação e concentração de fibras.

---

<sup>1</sup> HYDE, R. A. e MILLER, D. G.; PACKHAM, R. F.; RICHARDS, W. N. (1977). Water clarification by flotation. *Journal of The American Water Works Association*, v. 69 (7), p. 343-406, Jul.

② Flotação por pressurização: o ar dissolvido na água sob pressão é liberado quando esta é submetida à pressão atmosférica. Esse tipo tem recebido maior aceitação do que a flotação a vácuo por causa da maior queda de pressão disponível, permitindo que mais ar seja liberado. ZABEL<sup>2</sup> apud REALI (1991) declara que existem três processos básicos de FAD por pressurização:

- FAD com pressurização total do afluente: toda a vazão afluente é pressurizada;
- FAD com pressurização parcial do afluente: apenas uma parte da vazão afluente é pressurizada;
- FAD com recirculação pressurizada: uma parcela do efluente clarificado é pressurizada, recirculada e misturada ao afluente. Essa variante é aconselhável nos casos em que estão presentes no afluente partículas frágeis, as quais sejam suscetíveis de quebra de estrutura ao passarem pela bomba.

REALI (1991) menciona que a FAD apresenta algumas vantagens sobre a sedimentação. Entre elas, podem-se citar: a possibilidade de arraste de parcela de substâncias voláteis eventualmente presentes na água; a facilidade de oxidação de íons metálicos dissolvidos na água (ferro, por exemplo); a produção de lodo com elevado teor de sólidos na superfície do flotador e pelo fato de constituir um processo de alta taxa, requer unidades menores e versáteis, possibilitando melhor controle operacional, através do monitoramento da quantidade de ar fornecida ao processo.

Vale deixar aqui registrado que a descrição minuciosa da flotação, bem como de suas modalidades e de todos os parâmetros envolvidos nesta promissora técnica, não é o alvo principal do presente trabalho. Portanto, a fim de se obter um conhecimento detalhado sobre o assunto, aconselha-se, dentre outros trabalhos, a consulta de REALI (1984) e REALI (1991).

---

<sup>2</sup> ZABEL, T. (1984). Flotation in water treatment. In: IVES, K. J. ed. *The scientific basis of flotation*. Proceedings of the NATO Advanced Science Institute on the Scientific Basis of Flotation, Cambridge, England, Jul, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, p. 349-378.



### 3.1.1. Alguns aspectos sobre curvas de flotação

Uma questão que sempre levanta dúvidas no que se refere aos ensaios de flotação, é a da interpretação das curvas de distribuição de velocidades de flotação, as quais dão idéia da velocidade ascensional dos flocos obtidos em diferentes condições de coagulação e flotação. Portanto, torna-se recomendável descrever aqui a metodologia desenvolvida por REALI (1991) para a determinação da eficiência de remoção por flotação relacionada a cada tempo de flotação (ou velocidade de flotação), de maneira análoga à metodologia usualmente utilizada para obtenção em laboratório de curvas de sedimentação.

Conforme explanado por HUMENICK<sup>3</sup> apud REALI (1991), a distribuição das velocidades de sedimentação obtidas em ensaios de laboratório podem ser plotadas num gráfico como mostrado na FIGURA 1.1.

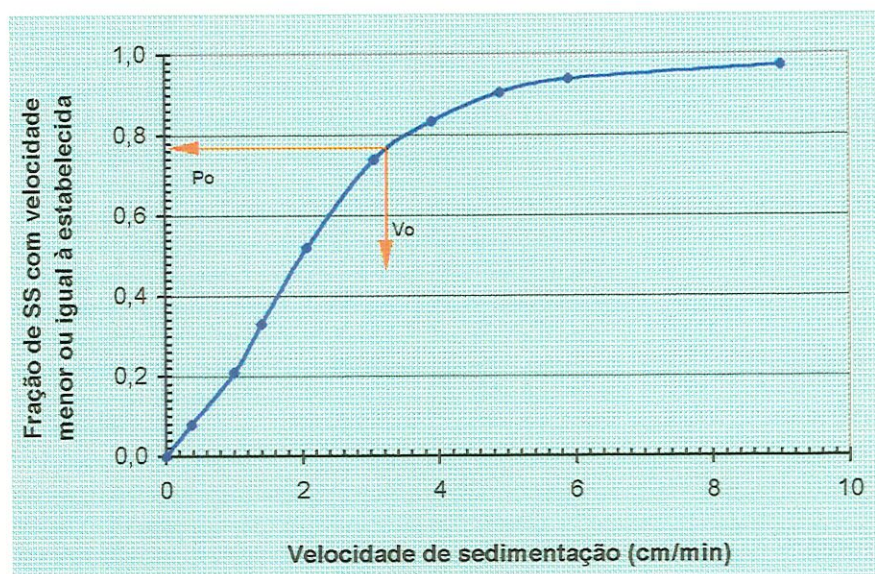


FIGURA 1.1 – Distribuição das velocidades de sedimentação de partículas (flocos). Fonte: HUMENICK<sup>3</sup> apud REALI (1991).

Segundo o referido autor, a equação que relaciona teoricamente a eficiência de remoção de sólidos suspensos num sedimentador ideal de

<sup>3</sup> HUMENICK Jr., H. E. (1977). *Water and wastewater treatment: calculations for chemical and physical processes*. New York, Marcel Dekker. 236 p.



fluxo horizontal com os dados fornecidos pela curva da FIGURA 1.1, pode ser escrita da seguinte forma:

$$R = (1 - P_0) + \frac{1}{V_{S_0}} \cdot \int_0^{P_0} V_S \cdot dP \quad (\text{Equação 1})$$

sendo:

$R$  : fração de remoção de sólidos suspensos por sedimentação;

$P_0$  : fração de partículas com velocidade de sedimentação menor ou igual a  $V_{S_0}$  ;

$V_{S_0}$  : taxa de aplicação superficial no sedimentador ideal (cm/min);

$\int_0^{P_0} V_S \cdot dP$  : obtido graficamente, corresponde à área compreendida entre a curva traçada, a flecha  $P_0$  e a origem dos eixos (vide FIGURA 1.1).

Com relação aos testes estáticos de flotação (flotatestes), tendo-se em vista a maneira com que as curvas de flotação são obtidas, é possível fazer-se uma analogia com as curvas de sedimentação descritas por HUMENICK<sup>3</sup>.

Para tornar possível a obtenção de tais curvas, REALI (1991) executou um pequeno orifício na parede do frasco de flotação, em que foi colocado um reduzido pedaço de mangueira de silicone (diâmetro igual a 2 mm), contendo uma pinça na extremidade externa (para fechamento da mangueira). Dessa maneira, era possível a inserção da ponta de uma seringa hipodérmica (20 ml) para coleta de amostras ao longo do período de flotação. O referido orifício foi confeccionado em um ponto situado a 20 cm acima do fundo do frasco.

Assim, com base na FIGURA 1.2, a equação anterior pode ser reescrita da seguinte forma:

$$E = (1 - F_0) + \frac{1}{(T.A.S.)} \cdot \int_0^{F_0} V_F \cdot dF \quad (\text{Equação 2})$$

sendo:

$E$  : fração de remoção de sólidos suspensos por flotação, esperada;

$F_0$  : fração de partículas com velocidade de flotação menor que  $(T.A.S.)$ ;

(*T.A.S.*): taxa de aplicação superficial na unidade de flotação ideal, definida como sendo a vazão total aplicada por unidade de área (em planta) da superfície de acumulação de lodo, medida, na prática, em  $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$  (cm/min);

$V_F$ : velocidade de flotação (cm/min);

$\int_0^{F_0} V_F \cdot dF$ : obtido graficamente, corresponde à área compreendida entre a curva traçada, a flecha  $F_0$  e o eixo  $y$  (vide FIGURA 1.2).

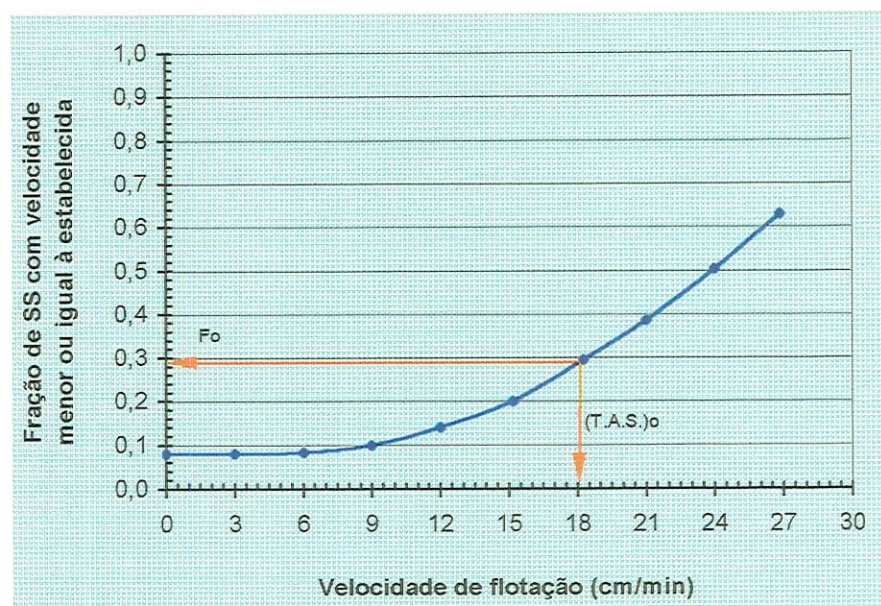


FIGURA 1.2 – Exemplo de curva de distribuição de velocidades de flotação de partículas ou flocos (curva de flotação). Fonte: REALI (1991).

Portanto, as curvas de flotação mostradas no Capítulo 5 deste presente trabalho, podem ser interpretadas empregando-se a Equação 2, cujo significado é idêntico àquele das curvas de sedimentação. É importante lembrar que quanto maior for a velocidade de flotação das partículas em suspensão, maior a taxa de aplicação superficial admitida em uma determinada unidade de flotação para consecução da mesma eficiência de remoção.

Entrementes, REALI (1991) ressalta que as previsões da eficiência de flotação das unidade de FAD, feitas a partir de curvas de flotação obtidas através de ensaios estáticos (flotatestes), são menos seguras que as



conjeturas de eficácia de sedimentadores, feitas a partir de testes de sedimentação em *Jar-Test*. Tal relevância fundamenta-se no fato de que a flotação apresenta, basicamente, duas variáveis a mais que a sedimentação, as quais são difíceis de serem perfeitamente simuladas nos testes estáticos. Essas variáveis são a frequência de colisões efetivas entre bolhas e flocos e a taxa de aglutinação de microbolhas, conforme detalhado pelo supracitado autor, em sua tese. Por conseguinte, a interpretação de resultados obtidos em flotatestes deve ser feita sempre levando-se em conta tais ressalvas.

De qualquer forma, REALI (1991) declara, ainda, que, desde que devidamente interpretados, os testes de flotação em escala de laboratório são capazes de fornecer informações muito valiosas, sobretudo do ponto de vista das condições de coagulação visando a flotação.

### **3.1.2. O emprego da FAD no tratamento de águas residuárias**

Sabe-se que, nos últimos anos, o processo anaeróbio vem sendo cada vez mais empregado no tratamento de esgotos sanitários. Os reatores dessa natureza apresentam diversas vantagens frente aos reatores aeróbios, como, por exemplo, o baixo custo de construção, operação e manutenção das instalações, baixa produção de lodo e a possibilidade de aproveitamento do gás metano. Todavia, devido à sua própria natureza, o efluente anaeróbio necessita passar por tratamento complementar, conforme verificado por CAMPOS et al. (1996). De acordo com os referidos autores, apesar de o efluente dos reatores anaeróbios necessitar de pós-tratamento, as combinações anaeróbio-aeróbio ou anaeróbio-físico-químico ainda se tornam mais vantajosas do que o processo essencialmente aeróbio.

CAMPOS et al. (1996) realizaram estudos preliminares em escala de laboratório, visando avaliar a potencialidade do uso do pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio por coagulação/floculação/FAD. Embora de maneira superficial, também foi enfocada a desinfecção dos esgotos tratados, empregando-se radiação ultravioleta. Para tanto, objetivaram-se as



remoções dos seguintes parâmetros: DQO, DBO, P<sub>total</sub>, N, SS e coliformes. A água de estudo provinha de um reator anaeróbio de chicanas, de volume igual a 11 m<sup>3</sup> e tempo de detenção hidráulico de 12 horas, construído na EESC-USP. Os produtos químicos empregados para a coagulação foram: cloreto férrico, sulfato de alumínio e cal hidratada. No decorrer de todos os ensaios, mantiveram-se fixos os seguintes parâmetros: (i) mistura rápida: 30 s e gradiente médio de velocidade em torno de 600 s<sup>-1</sup>; (ii) floculação: 20 min e respectivo gradiente médio de velocidade por volta de 40 s<sup>-1</sup>; (iii) flotação: amostras coletadas com T.A.S. equivalente a 70 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia, fração de recirculação, em volume, de 20 % e pressão de saturação de 450 kPa; (iv) temperatura: 22 °C.

Os resultados alcançados a partir do sistema composto por reator anaeróbio de chicanas (11 m<sup>3</sup>), flotação por ar dissolvido (flotateste) e desinfecção por radiação UV (escala piloto) indicaram potencialidade de remoção de DBO superior a 85 % e de coliformes fecais superior a 99,999 %. Os melhores resultados quanto à remoção de SSV, P total, DQO, DBO e turbidez foram obtidos com a aplicação de cal. Porém, tal uso resultou em dosagens elevadas e pH efluente em torno de 9,3. Levando-se em conta as remoções atingidas e as dosagens empregadas, o melhor resultado foi obtido através da aplicação de 100 mg/L de cloreto férrico associada com 50 mg/L de cal. Dessa feita, a remoção de DQO e de DBO foram, ambas, iguais a 73 %. A remoção de fósforo alcançou 84 %, enquanto a de nitrogênio (NTK) chegou a 49 %.

Além de promover remoção significativa de DBO e de DQO, fica demonstrado que o uso de tratamento químico proporciona valores de remoção de fósforo dificilmente atingidos por processos biológicos. Os autores acrescentam que o uso da FAD, com adição de cloreto férrico e cal, melhora a remoção de patogênicos. O lodo flotado poderá receber a adição de cal (pH > 12,0) para efetuar sua desinfecção, podendo ser reaproveitado na agricultura após certo período de repouso. Os autores ainda defendem que o uso do cloreto férrico, em lugar de sulfato de alumínio, deve ser valorizado, pois a presença de ferro em lodos não se converte em aspectos

negativos, como aqueles originados da presença de sulfato de alumínio, uma vez que o alumínio é muito nocivo ao solo e pode provocar danos à saúde dos seres vivos, no caso de ocorrer a sua ingestão.

É importante mencionar que esses estudos preliminares realizados por CAMPOS et al. (1996) serviram de base para a programação do trabalho de mestrado de PENETRA (1998).

Em sua pesquisa, PENETRA (1998) apresentou e discutiu os resultados obtidos em laboratório e em instalação piloto de flotação com escoamento contínuo, recebendo efluente de reator anaeróbio de manta de lodo (UASB), com 18 m<sup>3</sup> de volume, tratando esgoto sanitário.

Para a realização dos ensaios no flotatestes, o referido autor testou diferentes dosagens de cloreto férrico (entre 30 e 110 mg/L) ou de polímero catiônico (entre 1,0 e 16,0 mg/L), atuando como coagulantes. Além disso, foram estudadas as condições de floculação (tempos de 15 e 25 min, e gradiente médio de velocidade entre 30 e 100 s<sup>-1</sup>) e diferentes valores de quantidade de ar fornecida ao processo (entre 4,7 e 28,5 g(ar) /m<sup>3</sup>(efluente)).

Com a instalação piloto de FAD, foram executados apenas ensaios preliminares, variando-se a taxa de aplicação superficial (140 e 210 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia) para diferentes valores de quantidade de ar fornecida ao processo (14,8 a 29,5 g(ar) /m<sup>3</sup>(efluente)).

Com o emprego de dosagem de 65 mg/L de cloreto férrico, de tempo de floculação de 15 min e gradiente médio de velocidade de 80 s<sup>-1</sup> e de 19 g(ar)/m<sup>3</sup>(efluente), PENETRA (1998) verificou excelentes resultados em laboratório, com elevadas remoções de DQO (89 %), de P total (96 %), de SST (96 %), de turbidez (98 %), de cor aparente (91 %) e NTK (47 %). Considerando o sistema UASB e FAD, nos testes em laboratório, foram observadas remoções globais de 97,7 % de DQO, de 98,0 % de P total, de 98,9 % de SST, de 99,5 % de turbidez, de 97,8 % de cor aparente e de 59,0 % de NTK. Nos ensaios com instalação piloto de FAD, apesar da não otimização dos parâmetros de seu projeto e de sua operação, o sistema apresentou remoções de 93,6 % de DQO, de 87,1 % de SST, de 90 % de sulfetos e de 30 % de NTK.



Os resultados obtidos por PENETRA (1998), confirmam que o sistema envolvendo o emprego de reatores anaeróbios seguidos de sistema de flotação por ar dissolvido constitui alternativa bastante atraente, capaz de promover elevado grau de tratamento de esgotos sanitários. Assim, com base neste estudo, teve início a programação da primeira etapa de ensaios do presente trabalho.

É digno de nota registrar que, em sua dissertação, PENETRA (1998) faz um completo levantamento bibliográfico, sobretudo no que diz respeito a outros casos de utilização da FAD no tratamento de águas residuárias, aos mecanismos de coagulação e floculação, à química de remoção do fósforo, bem como a sua importância nos sistemas biológicos. Portanto, a fim de se obter um bom embasamento nestes tópicos, recomenda-se, entre outras, a leitura do trabalho de mestrado do supracitado autor, disponível na Biblioteca Central da EESC-USP.

### **3.2. O reator anaeróbio com chicanas**

O reator anaeróbio com chicanas protótipo utilizado durante o ano de 1998 na presente pesquisa foi construído e investigado por POVINELLI (1994). A pesquisa desenvolveu-se com base em um reator com volume de 11 m<sup>3</sup>, com três câmaras em série e um “filtro” de pedregulho, instalado junto ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP, durante um período de 12 meses. Nos primeiros seis meses procederam-se os estudos hidrodinâmicos e nos seis subseqüentes, o reator foi operado tratando esgoto sanitário com tempo de detenção hidráulica de 12 horas.

De acordo com POVINELLI (1994), o reator anaeróbio com chicanas é relativamente semelhante à unidade utilizada como floculador hidráulico de tratamento de água de abastecimento. Dispondo de diversas chicanas verticais, localizadas de maneira tal que obriguem a água residuária afluenta a movimentar-se descendente e ascendentemente atravessando regiões de elevada concentração de microrganismos ativos que se formam junto ao



fundo do reator. A FIGURA 2 mostra um esquema simplificado deste tipo de reator.

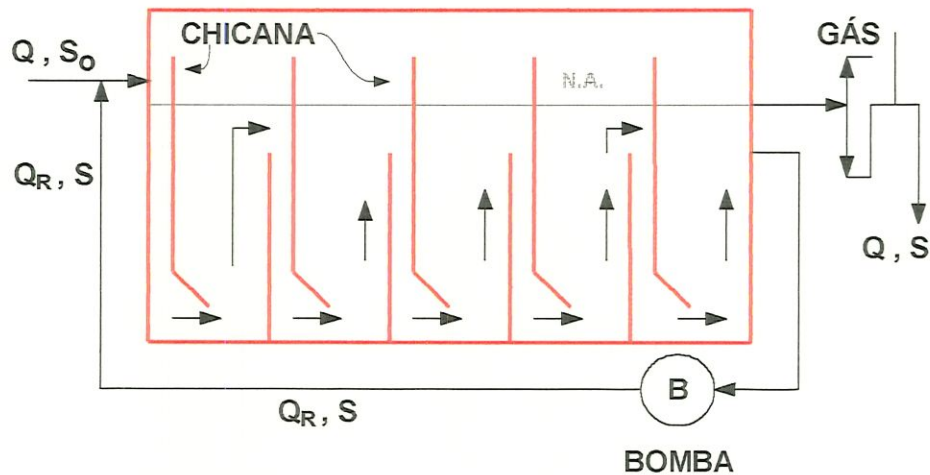


FIGURA 2 – Esquema do reator anaeróbico de chicanas. Fonte: POVINELLI (1994).

Povinelli (1994) aponta que o reator anaeróbico com chicanas possui a vantagem de promover a retenção de biomassa de maneira muito simples, poupando custos com material de enchimento ou com dispositivos de separação gás/líquido/sólido. Segundo a autora, algumas outras vantagens encontradas na bibliografia consultada, referente a esse reator, são as seguintes:

- ⊗ Não utiliza equipamentos onerosos como agitadores, nem ocasiona gastos de energia;
- ⊗ Necessita de pequenas profundidades;
- ⊗ Tendo em vista a natureza do escoamento no seu interior, o arraste de microrganismos é reduzido;
- ⊗ É propício à formação de grânulos que retêm grande quantidade de biomassa ativa;
- ⊗ O tempo de detenção hidráulico é relativamente baixo;
- ⊗ Pode ser operado durante longos períodos de tempo sem descarte de lodo;
- ⊗ Pode suportar despejos com altas e baixas concentrações de DBO;

- ❖ Possui elevada estabilidade e reabilitação;
- ❖ Pode funcionar a baixas temperaturas (13 °C);
- ❖ Pode apresentar boa remoção de DQO e DBO (de até 85 % a 95 %);
- ❖ Possibilita a separação de fases; etc.

CAMPOS et al.<sup>4</sup> apud POVINELLI (1994) manifestam que estão sendo observados por pesquisadores e profissionais alguns problemas nos reatores anaeróbios, em diversos casos em que foram utilizados, entre eles: eficiência menor que a esperada, exalação de maus odores, arraste de lodo, etc. Tais autores afirmam que, na maioria dos casos, não se pode atribuir ao processo em si a causa dos problemas, mas sim à falta de respeito ou desconhecimento dos projetistas e operadores no que concerne aos conceitos básicos relacionados com o processo anaeróbio e com os reatores envolvidos. Dentre os possíveis equívocos mais comuns, podem ser citados:

- ❖ Velocidade ascensional inadequada;
- ❖ Distribuição do afluente imprópria;
- ❖ Sistema separador de sólidos e gases equivocado;
- ❖ Procedimento de partida falho;
- ❖ Deficiência de nutrientes e micronutrientes;
- ❖ Presença contínua ou eventual de tóxicos;
- ❖ Existência de óleos e graxas em concentrações elevadas;
- ❖ Geometria do reator inadequada;
- ❖ Hidrodinâmica do reator incompatível com as necessidades; etc.

Dessa feita, recomenda-se que se tome vários cuidados no projeto e na operação de reatores anaeróbios, não superestimando suas capacidades de biodegradabilidade em tempos de detenção pequenos, nem subestimando seus dimensionamentos.

Em se desejando obter maiores informações a respeito do reator anaeróbio com chicanas, torna-se aconselhável a consulta à dissertação de POVINELLI (1994), disponível na Biblioteca Central da EESC-USP.

---

<sup>4</sup> CAMPOS, J. R. et al. (1991). Tratamento de esgotos sanitários por reatores de manta de lodo e reatores anaeróbios com chicanas. *Apostila obtida por comunicação pessoal*. São Carlos.



### 3.3. Ozônio

#### 3.3.1. Aspectos gerais

NEBEL (1981) relata que o ozônio tem sido utilizado no tratamento de águas de abastecimento desde 1903. Tal uso, o qual foi primeiramente desenvolvido na Europa, constitui-se na principal aplicação do ozônio e, até nossos dias, mais de mil estações européias de tratamento de água adotaram esta prática. Desde o período em que o ozônio começou a ser utilizado na Europa, é sabido que o conhecimento teórico de seus efeitos em níveis moleculares e o progresso tecnológico de sua produção tiveram considerável desenvolvimento.

O emprego do ozônio no tratamento de águas de piscina também provém de modelo europeu, elaborado durante a década de 50. Ainda segundo NEBEL (1981), a segunda maior utilização do ozônio é no tratamento de odores provenientes de processos industriais e em unidades de tratamento de águas residuárias municipais. Sua aplicação no tratamento de efluentes secundários municipais também vem ganhando notoriedade.

RICHARD<sup>5</sup> apud DI MATTEO (1992) declara que as técnicas de ozonização foram desenvolvidas de forma mais significativa nos últimos 25 anos, especialmente na França, Alemanha e Suíça. Na América do Norte, no Japão e na África do Sul, conforme DI MATTEO (1992), o ozônio começou a ser recentemente empregado em tratamento de água.

No Brasil, a referida autora menciona que FRANCISCO<sup>6</sup> aponta para o uso da tecnologia do ozônio começando em 1983, quando algumas estações de tratamento necessitaram de alternativas para os métodos convencionais de pré-cloração e pré-aeração de águas superficiais. De acordo com o autor, de 1985 em diante, a partir da associação entre duas

---

<sup>5</sup> RICHARD, Y. R. (1988). Use of ozone in drinking water production. In: THE INTERNATIONAL OZONE SYMPOSIUM, Rio de Janeiro, 1988. *Proceedings*. Rio de Janeiro.

<sup>6</sup> FRANCISCO, JR. R. (1988). Experiences with ozone in Brazil. In: THE INTERNATIONAL OZONE SYMPOSIUM, Rio de Janeiro, 1988. *Proceedings*. Rio de Janeiro.

indústrias nacionais, uma experiência considerável em procedimentos laboratoriais, estações piloto em campo e no mercado dos ozonizadores industriais foi adquirida.

O referido autor revela, ainda, que foram efetuados testes pilotos de pré-ozonização em estações de tratamento de água, como a de Manaus (rio Negro), no estado do Amazonas, e a do Baixo Cotia, na região metropolitana de São Paulo. Segundo o mesmo autor, algumas indústrias, como a Pirelli, localizadas em Campinas e Sumaré (SP), bem como a Cutrale, em Araraquara (SP), estão empregando a pré-ozonização em suas estações de tratamento de água para uso industrial. O ozônio também está sendo utilizado, e com sucesso, no controle da qualidade microbiológica no processo de engarrafamento de água mineral, em São Paulo e em algumas cidades do interior do estado paulista, como por exemplo, Americana e Santa Rosa do Viterbo.

De acordo com GLAZE (1987), entre os importantes processos químicos envolvidos no tratamento de água podem ser citados: (i) a desinfecção, que previne as doenças caracterizadas por veiculação hídrica e, (ii) a oxidação, que promove a degradação e remoção de compostos indesejáveis, que podem ser tóxicos, ou que causam sabor e odor desagradáveis, ou cor na água.

Sabe-se que o cloro tem sido a escolha tradicional nas estações de tratamento de água por ser um forte desinfetante e oxidante. ROOK<sup>7</sup> apud DI MATTEO (1992) descreve que, na década de 70, observou-se que a adição de cloro nas águas para abastecimento público não trazia somente efeitos positivos. Através da reação do mesmo com a matéria orgânica, são formados subprodutos prejudiciais à saúde humana, especialmente compostos halogenados, tais como os trihalometanos (THM). Tal efeito negativo é intensificado pela qualidade declinante da água bruta, devido ao aumento dos volumes dos esgotos domésticos e de águas residuárias industriais lançados nos rios e aos avanços tecnológicos que incluíram a

---

<sup>7</sup> ROOK, J. J. (1974). Formation of haloforms during chlorination of natural waters. *Journal of Water Treatment Examination*. n. 23, p. 234-243.



produção de mais compostos químicos, elementos estes que, invariavelmente, aparecem nos afluentes às estações de tratamento de água.

Muitas investigações têm sido realizadas no que se refere aos métodos alternativos para a substituição do cloro livre. O tratamento por cloraminas (combinação do cloro livre com amônia) surgiu como a alternativa mais popular para o processo da desinfecção, porque produzem menos THM. No entanto, as cloraminas são oxidantes fracos e necessitam de um auxiliar na pré-oxidação. Os oxidantes mais fortes, como o dióxido de cloro e o ozônio, estão sendo considerados como substitutos do cloro no início e na fase intermediária do tratamento de água (GLAZE (1987)).

A TABELA 1 mostra uma comparação relativa entre as propriedades do cloro e do ozônio.

**TABELA 1 – Comparação das propriedades do cloro e do ozônio. Fonte: DI MATTEO (1992).**

Propriedade	Cloro	Ozônio
◇ Oxidante	Bom	Excelente
◇ Desinfetante	Bom	Excelente
◇ Riscos à saúde	Doenças de rins e fígado, câncer e tumores	Não conhecidos
◇ Residual	Excelente	Pobre

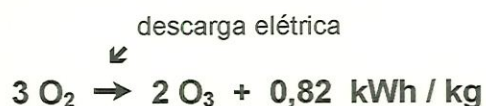
Conforme COLLINS et al. (1987), tem sido cada vez maior o número de estações de tratamento que empregam o ozônio não só como desinfetante primário, mas também para a realização de uma ou mais atividades de oxidação. Os autores relatam que as utilizações do ozônio envolvem:

- ✓ Desinfecção bacteriana e inativação viral;
- ✓ Remoção de substâncias orgânicas, tais como detergentes, materiais húmicos, pesticidas e fenóis;

- ✓ Auxiliar de coagulação;
- ✓ Remoção de cor, sabor e odor;
- ✓ Remoção de precursores de trihalometanos;
- ✓ Oxidação de ferro e manganês;
- ✓ Destruição de algas;
- ✓ Rompimento de ligações organometálicas, permitindo que metais, como por exemplo, Fe (III) e Mn (IV) reajam como coagulantes dos compostos orgânicos remanescentes, levando a uma melhor precipitação;
- ✓ Oxidação de cianeto para cianato e eventualmente para dióxido de carbono, água e outros compostos; etc.

### 3.3.2. Produção

O ozônio é comumente produzido por descarga elétrica em uma abertura, através da qual escoam um gás contendo oxigênio (SCHULHOF & SMITH (1988)). De acordo com os autores, o ar ou o oxigênio seco escoam em uma célula onde se tem a descarga elétrica, produzida por uma fonte elétrica de alta voltagem, ocorrendo a seguinte reação:



Segundo os referidos autores, a concentração de ozônio gerado do ar ou do oxigênio é tão baixa que a eficiência de sua transferência para a fase líquida é uma consideração econômica extremamente importante. Por esta razão, são utilizadas câmaras de contato bem altas e cobertas. O ozônio é geralmente difundido da câmara em bolhas finas que proporcionam mistura da água residuária tão eficiente que alcança a máxima transferência e utilização de ozônio. Um bom sistema difusor, conforme recomendado pelos autores supracitados, deve, normalmente, alcançar 90 % de transferência de ozônio.

As câmaras de contato devem conter um compartimento que trate e destrua qualquer quantidade de ozônio remanescente (excesso), pois este

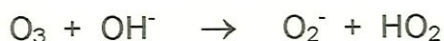


se constitui num gás extremamente tóxico e irritante. A eliminação pode ser realizada através de: decomposição catalítica, decomposição em solução aquosa contendo NaOH e Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, diluição, tratamento por carvão ativado, destruição térmica. O produto formado pela destruição do ozônio remanescente é o oxigênio, o qual pode ser reaproveitado se é ele utilizado na produção do ozônio (SCHULHOF & SMITH (1988)).

### 3.3.3. Propriedades químicas

Em acordo com NEBEL (1981), o ozônio é o segundo oxidante mais poderoso que existe, sendo excedido apenas pelo flúor e pelo radical OH<sup>o</sup> (gerado na própria decomposição do O<sub>3</sub>), neste potencial. Trata-se de um gás que ferve a -112 °C à pressão atmosférica, é parcialmente solúvel na água e facilmente detectável no meio líquido, em concentrações muito baixas (0,01 a 0,05 mg/L).

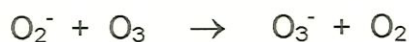
Em pesquisas realizadas por STAEHELIN & HOIGNÉ (1982), notou-se que, em água pura, a decomposição do ozônio se inicia pela sua reação com íons OH<sup>-</sup>:



Os autores apontam que o superóxido aniônico (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) e o radical hidroperoxil (HO<sub>2</sub>) estão em equilíbrio, de tal forma que:



Durante a propagação, o íon superóxido (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) transfere imediatamente um elétron ao O<sub>3</sub>, formando o ânion ozoneto (O<sub>3</sub><sup>-</sup>) e oxigênio molecular.



Os mencionados autores reportam que o ânion ozoneto (O<sub>3</sub><sup>-</sup>) é protonado e, em seguida, decompõe-se a radical OH, podendo reagir com qualquer soluto:



A FIGURA 3 ilustra um esquema da decomposição do ozônio em água pura.

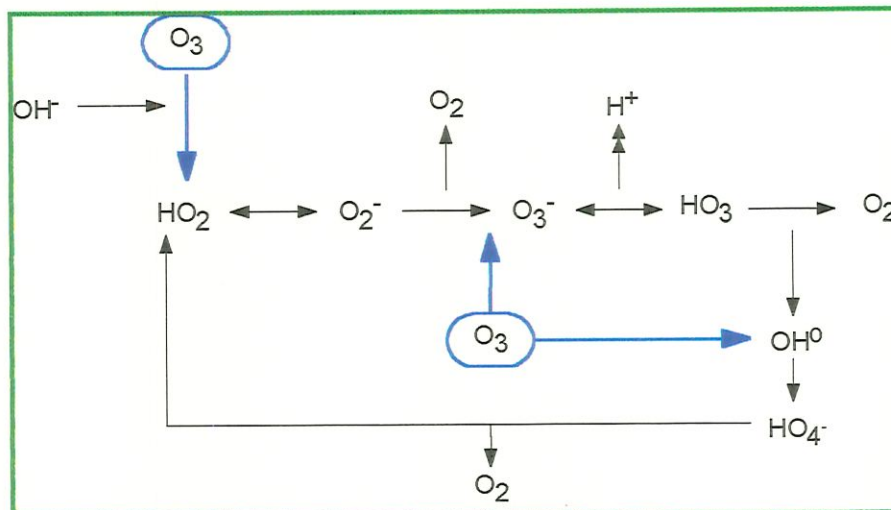


FIGURA 3 – Mecanismo de cadeia cíclica da decomposição do ozônio. Fonte: GLAZE (1987).

Segundo investigações efetuadas por GILLI et al. (1989), os mecanismos de ação do ozônio em compostos orgânicos ocorrem através de suas reações com estes compostos, podendo ser divididos em dois tipos: reações diretas, as quais envolvem o ozônio molecular e reações indiretas, que abrangem reações com os radicais hidroxilas  $OH^\bullet$ .

HOIGNÉ & BADER (1983) afirmam que, enquanto a reação direta do ozônio é altamente seletiva e relativamente lenta, a reação indireta pode ocorrer facilmente, com a rápida reação do radical  $OH^\bullet$  com os muitos compostos presentes na massa líquida.

A FIGURA 4 mostra, de forma esquemática, as reações do ozônio com compostos orgânicos presentes na água.



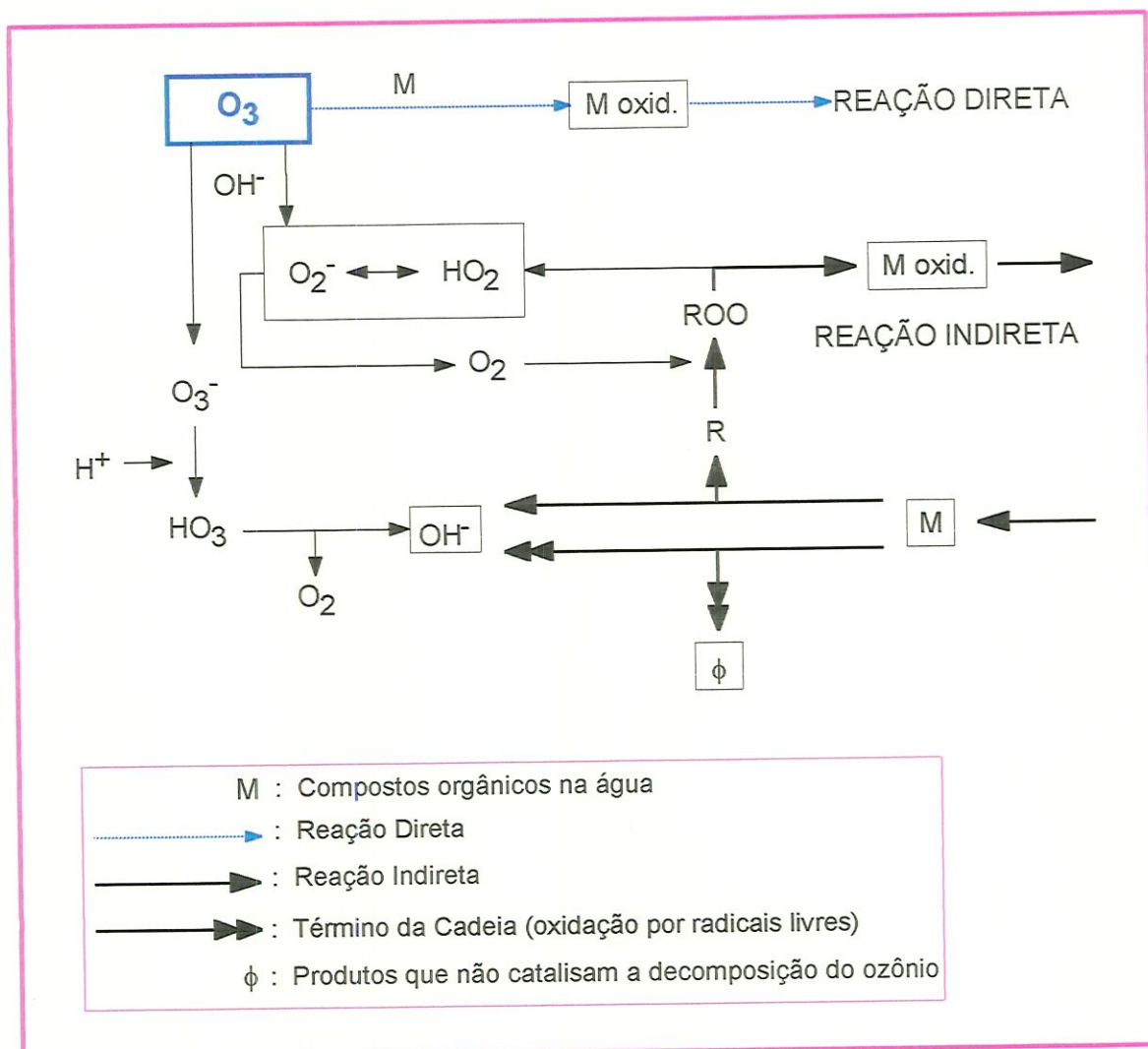


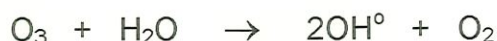
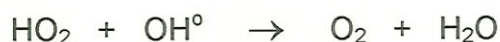
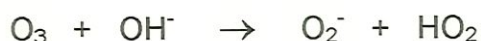
FIGURA 4 – Reações entre o ozônio e compostos orgânicos na água. FONTE: GILLI et al. (1989).

NEBEL (1981) atesta que a forte natureza eletrofílica do ozônio propicia a sua reação com um amplo espectro de grupos funcionais orgânicos e organo-metálicos. De acordo com o autor, é possível observar que o ozônio pode reagir diretamente para formar carbonilas. A maioria das reações diretas do ozônio com compostos orgânicos baseiam-se na divisão da dupla ligação do carbono-carbono, comportando-se como um dipólo, como um agente eletrofílico em aromáticos e, como agente nucleofílico na ligação de C=N (NEBEL (1981)).

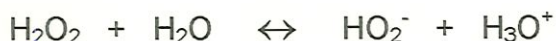
Sob condições de pH ácido ou neutro, o ozônio molecular dissolvido reage com materiais orgânicos. Em condições de pH alcalino, o ozônio

decompõe-se primeiramente para formar radicais hidroxilas ( $\text{OH}^\circ$ ), os quais reagem rapidamente com a maioria dos compostos orgânicos. Os radicais hidroxilas são conhecidos por serem mais reativos e menos seletivos em suas reações que o ozônio molecular (BOLLYKY & SILER<sup>8</sup> apud DI MATTEO (1992)).

Em meio aquoso, como exemplo de reações que podem ocorrer, conforme exposto por DI MATTEO (1992), têm-se:



STAEHELEN & HOIGNÉ (1982) identificaram o ânion peróxido de hidrogênio ( $\text{HO}_2^-$ ) como uma das espécies que podem iniciar o processo da cadeia cíclica, ilustrada na FIGURA 3. Os autores verificaram que o peróxido de hidrogênio aumenta a eficiência do ozônio na remoção de substâncias orgânicas. Os pesquisadores citam dois exemplos de reações do ozônio com o peróxido de hidrogênio:



SIERKA et al.(1989) também observaram que a fotólise da molécula de ozônio pela radiação ultravioleta produz espécies altamente reativas, tornando possível a oxidação de vários compostos orgânicos.

Consoante estudos de STAEHELEN & HOIGNÉ (1982), pode-se asseverar que os radicais hidroxilas reagem com íons carbonatos, íons bicarbonatos e outros, que consomem os radicais  $\text{OH}^\circ$ , podendo, assim, inibir as reações de oxidação de solutos orgânicos através de reações de

<sup>8</sup> BOLLYKY, L. J.; SILER, J. (1989). Removal of tributyl phosphate from aqueous solution by advanced ozone oxidation methods. In: THE NINTH OZONE WORLD CONGRESS. New York, 1989. *Proceedings*. New York, USA.



radicais livres e limitar a taxa de decomposição do ozônio na água.

NEBEL (1981) relata que a química inorgânica do ozônio abrange a maioria dos membros da Tabela Periódica, já que o ozônio é dotado de um potencial de oxidação com cerca de 2,09 V. Segundo o autor, o ozônio pode reagir com íons metálicos, como o cálcio e o sódio, formando ozonetos e óxidos. Todos os membros da série dos haletos, excetuando o flúor, reagem com o ozônio.

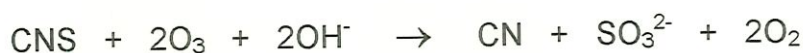
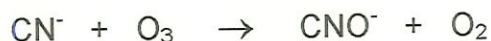
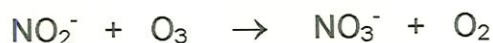
Seguindo os princípios termodinâmicos, NEBEL (1981) afirma que o íon cloreto pode reagir com o ozônio para formar cloro. Todavia, esta reação é limitada a reações cinéticas muito lentas e de baixas taxas de produção. Apenas em condições ácidas é que os cloretos são oxidados, muito lentamente, para a forma de cloro. Já o brometo é oxidado pelo ozônio a bromo, bromato e hipobromito em taxas mais elevadas que o íon cloreto. O iodeto reage com o ozônio para formar o iodo. A reação do ozônio com o iodeto de potássio forma o princípio de várias técnicas analíticas do ozônio.

Continuando suas análises, o autor supracitado assegura que os íons metálicos alcalinos não são reativos ao ozônio, por possuírem apenas um estado de oxidação. Esses metais podem formar ozonetos iônicos cristalinos, que contêm o íon  $O_3^-$ . Os metais de transição são oxidados pelo ozônio em seus mais altos estados de oxidação, os quais são geralmente menos solúveis em água. Segundo DI MATTEO (1992), esse método de remoção de íons metálicos é empregado comercialmente em muitas estações de tratamento de água, onde existe a necessidade da remoção de ferro e manganês, a níveis muito baixos. Além desses, a autora menciona que podem ser removidos, pela oxidação por ozônio e filtração de águas poluídas, metais como níquel, mercúrio, chumbo e outros.

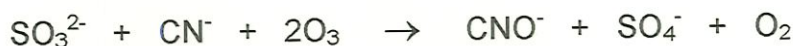
NEBEL (1981) atesta que, embora os mecanismos da ação do ozônio sobre os diversos metais ainda não estejam elucidados por completo, são bem conhecidas as equações segundo as quais o ferro e o manganês são oxidados:



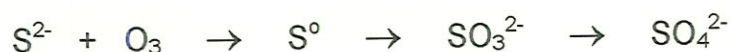
No que diz respeito ao nitrogênio, GARLAND et al. (1980) citam os ânions nitrogenosos, como por exemplo, nitritos, cianetos, cianatos, tiocianatos e outros, os quais são oxidados pelo ozônio:



Os autores mencionam também que a oxidação do sulfito ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) e cianetos ( $\text{CN}^-$ ) pelo ozônio, produzem:



O íon sulfeto pode ainda ser facilmente oxidado a enxofre, sulfito e finalmente, a sulfato:



### 3.3.4. Transferência

Segundo NEBEL (1981), quando o ozônio é utilizado para tratar águas de abastecimento público ou águas residuárias, deve ser transferido da fase gasosa, na qual é gerado, para a fase líquida. RICE & NETZER (1982) afirmam que os sistemas mais comuns de aplicação de ozônio são os processos heterogêneos, que envolvem transferência de massa do ozônio por meio de bolhas, para o meio aquoso, através da interface gás/líquido.

De acordo com os autores, os fatores que afetam a transferência de



massa do ozônio no líquido e os quais eles mesmos são afetados pelo projeto e operação dos sistemas de contato, são:

- ☆ Concentração do ozônio na fase gasosa;
- ☆ Temperatura, pressão e pH;
- ☆ Método de transferência e tempo de contato;
- ☆ Dimensão das bolhas de gás.

GUROL<sup>9</sup> apud DI MATTEO (1992), informa que os efeitos físicos e as reações químicas que ocorrem numa câmara, onde a mistura gasosa ar-ozônio ou oxigênio-ozônio entra em contato com a água, para remover poluentes, podem ser:

- ★ Transferência da massa de ozônio da fase gasosa para a fase líquida;
- ★ Transferência da massa de compostos voláteis da água para a fase gasosa;
- ★ Reação química do ozônio com os compostos existentes na água;
- ★ Decomposição do ozônio nas fases líquidas e gasosas;
- ★ Reação química dos radicais livres, produtos da decomposição do ozônio;
- ★ Formação do residual de ozônio na fase líquida;
- ★ Caminhamento de pequenas bolhas de ozônio para a saída da câmara.

NEBEL (1981) comenta que, em águas poluídas, uma variável importante que afeta a transferência de massa do ozônio é a concentração do mesmo dissolvido em relação ao material reativo presente na água. Quando estes compostos reativos estão presentes, a eficiência de transferência de massa de ozônio é aumentada. Quanto maior a concentração do gás ozônio, maior a eficiência de transferência e, desta maneira, menor será o volume necessário de gás transportado, resultando em câmaras de contato de tamanhos menores, reduzindo os custos de operação.

Através de vários experimentos, LAPLANCHE et al. (1989), mostraram, no entanto, que se houver um grande aumento da concentração

---

<sup>9</sup> GUROL, M. D. (1985). Factors controlling the removal of organic pollutants in ozone reactors. *Journal of The American Water Works Association*, v.77 (8), p. 55-65.

do gás ozônio, a eficiência de transferência não atinge valores muito maiores que 5 %, além de ocorrer um drástico aumento da concentração do gás a ser lançado na atmosfera.

Estudos realizados por NEBEL (1981) e SOTELO et al. (1989), demonstram que a pressão parcial do ozônio na fase gasosa é diretamente proporcional à solubilidade do ozônio na água, concordando com a Lei de Henry.

No que tange ao efeito da temperatura na transferência de ozônio, os referidos autores verificaram que o aumento da temperatura na água provoca um decréscimo na concentração do ozônio dissolvido, devido à queda da força dirigida na fase líquida, à maior taxa de decomposição do ozônio e às taxas de reações mais rápidas.

Através de gráficos resultantes de ensaios laboratoriais, com água preparada com adição de sal de fosfato de sódio, na quantia necessária para obtenção dos valores de pH e força iônica requeridos para os testes de ozonização, em câmara de contato dotada de agitador, SOTELO et al. (1989) constataram que, para um dado pH e com aumento do tempo de ozonização, a concentração do ozônio vai aumentando numa taxa menor até atingir um valor limite para cada temperatura de estudo.

NEBEL (1981) assegura que a superfície de contato entre o gás e o líquido exerce grande influência sobre a taxa de absorção. Para aumentar a eficiência desse mecanismo, o gás contendo ozônio é introduzido na água em forma de bolhas nas câmaras de contato. O tamanho das bolhas tem considerável efeito na transferência do ozônio para a água e deve ser controlado, segundo o autor, pela escolha apropriada de um difusor de ozônio. Para o autor, as bolhas maiores são caracterizadas por áreas menores entre o gás e a água, tornando, desse modo, a eficiência menor.

Com relação ao tempo de contato entre as bolhas e a água, NEBEL (1981) sustenta que, quanto mais lenta for a ascensão das bolhas no meio líquido, maior será o tempo de contato. O autor também afirma que o aumento da altura da água na câmara pode aumentar o tempo de contato entre as bolhas e o meio líquido. Entretanto, alturas muito grandes de coluna

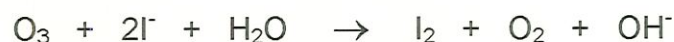


(maior que 5,5 m) não são praticáveis, pois a quantia transferida de ozônio não se justifica, em termos de economia de custos, previne o autor.

### 3.3.5. Determinação da concentração de ozônio

O controle do processo de ozonização baseia-se em medições da dosagem de ozônio aplicada e em seu residual na água. A quantidade aplicada é determinada pela medição da concentração de gás ozônio que é transportada para a câmara de contato. A demanda é, geralmente, calculada pela diferença entre a concentração do gás ozônio afluente à câmara e a concentração efluente (excesso do gás) (DI MATTEO (1992)).

De acordo com MASSCHELEIN (1989), o método iodométrico é o mais utilizado para o controle do ozônio na fase gasosa (determinação da produção de ozônio pelo aparelho gerador). Tal método se baseia na oxidação do íon iodeto através do ozônio, liberando iodo. O gás contendo ozônio e oxigênio passa pela solução de iodeto de potássio, condicionada em frascos localizados antes da entrada do gás na câmara e logo na saída do gás excedente (*off gas*), onde reage quantitativamente para produzir um mol de O<sub>2</sub> para cada mol de ozônio:



Segundo o autor, o iodo liberado é então titulado com uma solução padrão de tiosulfato de sódio e, a concentração do ozônio, calculada. Em se havendo a necessidade de se manter concentrações de ozônio dissolvido na solução, as medições do seu residual auxiliam no controle e avaliação do processo de aplicação.

STANLEY & JOHNSON (1982), argumentam que as reações diretas e indiretas, nas quais as moléculas de ozônio são reduzidas quimicamente, são responsáveis pela grande diferença entre as dosagens aplicadas e as concentrações de residuais de ozônio. Em geral, estas reações não interferem nas determinações analíticas do residual de ozônio, a menos que sejam empregados reagentes ou águas de diluição em condições

desfavoráveis. O efeito secundário da decomposição do ozônio é a formação de produtos que possuem características físicas ou químicas similares a ele. Por conseguinte, alguns destes produtos podem interferir nas análises do residual de ozônio.

Os autores mencionam que, a situação mais freqüente, é o caso em que os compostos formados são oxidantes fortes e reagem com os agentes redutores analíticos da mesma maneira que a molécula de ozônio. Segundo estudaram, um dos principais produtos da decomposição é o radical hidroxila ( $\text{OH}^\circ$ ), que é um oxidante altamente reativo. Os autores relatam que os subprodutos de oxidação dos íons de ferro e manganês pelo ozônio interferem expressivamente em alguns dos métodos de análises existentes. Conforme advertem, o conhecimento da natureza química dos compostos produzidos pela molécula de ozônio em qualquer aplicação é essencial para a seleção de uma técnica apropriada de medição do residual de ozônio.

MASSCHELEIN (1989) ainda recomenda que, uma vez que o controle do residual de ozônio na água, dentre outras, apresenta grande importância na ação de controle sobre bactérias, vírus e parasitas com veiculação hídrica, a existência de residual de ozônio após um determinado tempo de contato, auxilia no controle do processo de pós-ozonização.

#### 3.3.5.1. Métodos para análise de ozônio dissolvido na água

LANGLAIS et al (1991), enumeram vários métodos de análises de ozônio dissolvido, entre eles:

- ❖ Método Iodométrico;
- ❖ Índigo Trissulfonato;
- ❖ Espectrofotometria por Ultravioleta;
- ❖ LCV (Leuco Cristal Violeta);
- ❖ DPD (Dietil-p-Fenil Diamina);
- ❖ ACVK (Ácido Cromo Violeta K);
- ❖ Sistemas Amperométricos com Eletrodos (revestidos com membranas ou não).



Atualmente, o método índigo é o mais recomendado para determinações de residuais de ozônio na água, segundo o "Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater (19<sup>th</sup> ed.)". Tal processo, tem como princípio, a descoloração do corante índigo com a adição do ozônio, medida através de espectrofotômetro, num comprimento de onda de 600 nm. Como vantagens, além de boa sensibilidade em níveis de concentração de ozônio abaixo de 1 mg/L, o método apresenta alta seletividade e rapidez. Todavia, pode sofrer interferências através do cloro e manganês, que, no entanto, podem ser corrigidas (STANLEY & JOHNSON (1982)).

O método iodométrico, utilizado no presente trabalho, tem como princípio, a oxidação de  $I^-$  a  $I_2$  com detecção de  $I_3^-$  pelos métodos eletrométricos, fotométricos ou por titulação. Este método possui como vantagem, a alta sensibilidade de detecção a concentração de 2  $\mu\text{g/L}$  de ozônio. Porém, pode sofrer interferência pela maioria dos oxidantes, sua reação estequiométrica é questionável e pode ocorrer uma provável perda de ozônio devido a coleta e manuseio das amostras (STANLEY & JOHNSON (1982)).

### 3.3.6. Pré-ozonização

DI MATTEO (1992) pronuncia que, em função dos vários benefícios obtidos com a pré-ozonização, vários países estão empregando o ozônio como oxidante em substituição ao cloro, antes do processo de coagulação. Com a pré-ozonização, segundo a autora, há oxidação de metais e matéria orgânica, desinfecção preliminar, decréscimo do consumo de coagulantes, redução da turbidez e da cor aparente natural, remoção de compostos que causam odor e sabor, decréscimo do consumo de compostos derivados do cloro, diminuição das concentrações de precursores de trihalometanos, destruição de algas, aumento da carreira de filtração e melhoria geral da qualidade da água.

De acordo com MASSCHELEIN (1989), a adição de um oxidante forte como o ozônio, na água bruta, altera a natureza ou a quantidade de cargas nas superfícies das partículas, facilitando a coagulação e a floculação.

FARVARDIN & COLLINS (1989) mencionam que as principais razões para o ozônio influenciar o processo de coagulação-floculação são resumidas por RECKHOW et al.<sup>10</sup>:

- \* Aumento de grupos funcionais orgânicos oxigenados, especialmente carboxílicos e fenólicos, conduzindo a uma maior capacidade de adsorção pelo floco do coagulante e a um aumento de complexação (primária, com cálcio ou magnésio e alumina);
- \* Decréscimo da massa molecular de substâncias húmicas dissolvidas (aumento da natureza hidrofílica);
- \* Ruptura de complexos organo-metálicos, permitindo que metais oxidados como o  $\text{Fe}^{+3}$  e  $\text{Mn}^{+4}$  ajam como coagulantes convencionais de compostos orgânicos remanescentes, conduzindo a uma melhor precipitação, principalmente se os metais forem primeiramente reduzidos e posteriormente oxidados;
- \* Liberação de diferentes tipos de biopolímeros, provenientes da ruptura das células das algas, que podem comportar-se como coagulantes, auxiliando no processo de coagulação-floculação;
- \* Formação de ozonetos, peróxidos orgânicos com radicais livres, que contribuem para a condensação ou polimerização de material orgânico de maneira similar à adição de polímeros convencionais.

Os autores relatam que o pH influi na eficiência da pré-ozonização, já que implica nas reações diretas (pH ácido) e indiretas do ozônio (o processo de decomposição é iniciado pelos íons hidróxidos, onde predomina, em valores de pH acima de 8,0). Segundo os autores, a maioria dos estudos estão na faixa média do pH (6,0 a 8,0), onde parte do ozônio reage

---

<sup>10</sup> RECKHOW, D. A.; SINGER, P. C.; TRUSSELL, R. R. (1986). Ozone as a coagulant aid. In: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION SEMINAR - OZONATION: RECENT ADVANCES AND RESEARCH NEEDS, Denver, 1986. *Proceedings*. Denver, Colorado.



com os solutos e o ozônio remanescente decompõe-se a radicais hidroxilas, reagindo então, com os solutos.

De acordo com observações de FARVARDIN & COLLINS (1989), se a dosagem de ozônio for maior que a ótima requerida, o benefício da pré-ozonização é diminuído, uma vez que o ozônio pode reagir, predominantemente, nas ligações mais suscetíveis, tais como as intermoleculares, existentes entre partículas ou indiretamente nas ligações entre metais e particulados, redundando na divisão de polímeros em fragmentos de pequenos tamanhos coloidais e o aumento da carga coloidal total do sistema, favorecendo a ocorrência de mais ligações metálicas. Isto só poderá ocorrer se os fragmentos menores existirem em larga escala para continuarem a agir como partículas coloidais.

Além disso, os autores reportam que, com o aumento da dosagem de ozônio, a degradação do ácido húmico é mais extensiva, resultando em moléculas que se comportam como partículas coloidais. Por conseguinte, o mecanismo da coagulação passa a ser o de varredura, onde as substâncias orgânicas são adsorvidas nos hidróxidos do coagulante, resultando num aumento da dosagem do coagulante. Dessa maneira, pode-se dizer que o aumento da dosagem de ozônio não traz expressivos benefícios, além de poder ser prejudicial à qualidade da água.

#### 3.3.6.1. Benefícios da pré-ozonização

##### ① Redução da dosagem de coagulante

FARVARDIN & COLLINS (1989) realizaram ensaios com diversas substâncias húmicas naturais e comerciais, submetidos à pré-ozonização, e constataram que a dosagem de coagulante foi reduzida em cerca de 13-30 % com melhoria na qualidade da água após a coagulação, quando comparada à água não submetida à pré-ozonização.

De acordo com DOWBIGGIN & SINGER (1989), os benefícios da desestabilização das partículas pelo ozônio foram observados com sulfato

de alumínio, cloreto férrico e polímeros catiônicos, não denotando dependência de nenhum tipo de coagulante testado. Na maioria dos casos, os benefícios do ozônio têm sido associados com baixas dosagens de coagulante.

## ② Oxidação de metais

DOWBIGGIN & SINGER (1989), afirmam que a presença de metais pesados nas águas de abastecimento causa problemas sérios, pois a formação de precipitados da maior parte dos metais ocorre com valores de pH bem mais elevados que aqueles normalmente requeridos para a coagulação. Metais como ferro e manganês podem estar presentes na água em forma de minerais ou combinados com vários compostos, como matéria orgânica ou sílica.

Os referidos autores ainda esclarecem que a aplicação do ozônio favorece a destruição dos compostos complexos que os metais pesados formam com outros compostos existentes. Ademais, com o aumento do potencial de oxidação do meio, ocorre redução do pH, beneficiando o meio para a formação do precipitado. Quando o ozônio é aplicado no início do processo de tratamento de água, as ligações organometálicas são rompidas, liberando mais cátions na solução, com subsequente aumento da adsorção-desestabilização das partículas ou, aumentando a quantidade de complexos organo-metálicos na superfície sólida, causando a desestabilização.

RICHARD<sup>5</sup> apud DI MATTEO (1992) observa que, quando compostos como ferro e manganês estão presentes na forma mineral, a oxidação pelo ozônio forma precipitados, resultando num aumento da coloração da água. Se as condições de pH forem favoráveis, o precipitado formado pode ser removido pela sedimentação, flotação ou filtração.

Segundo DI BERNARDO<sup>11</sup>, mencionado por DI MATTEO (1992), elevadas dosagens de ozônio podem conduzir à formação de compostos

---

<sup>11</sup> DI BERNARDO, L. (1989). *Ozonização. Apostila da Escola de Engenharia de São Carlos, USP*. São Carlos. 47 p.



indesejáveis, como o caso do manganês, em que pode ocorrer a formação do íon permanganato, que é tóxico e deve ser evitado nos sistemas de abastecimento de água. Por essa razão, RICHARD<sup>5</sup> sugere não aplicar o ozônio no final do processo de tratamento, em águas que ainda contenham residuais de ferro, manganês ou orgânicos, que possam causar a coloração, por serem passíveis de flocular devido à presença do ozônio.

DI BERNARDO<sup>11</sup> ainda atesta que, quando o ferro ou o manganês estão presentes como cátions livres, eles são mais facilmente oxidados por agentes menos poderosos. Entrementes, quando o manganês se encontra complexado com matéria orgânica, o cloro não tem se mostrado eficiente na quebra de tais complexos. Nestes casos, o ozônio tem sido usado como pré-oxidante para permitir a remoção posterior desses metais.

### ③ Compostos orgânicos

A oxidação parcial de poluentes orgânicos que são dissolvidos em água, pelo ozônio, produz compostos polares que aumentam a eficiência da remoção de compostos orgânicos pela coagulação com sais de alumínio e ferro. Algumas substâncias são oxidadas rapidamente pelo ozônio, incluindo ácidos húmicos, detergentes, fenóis, pesticidas, compostos aromáticos, proteínas e aminoácidos (NEBEL (1981)).

#### a) Substâncias húmicas

SIERKA et al. (1989) relatam que as substâncias húmicas correspondem a aproximadamente 50 % do carbono orgânico dissolvido, presente na maioria das águas naturais. A estabilidade das moléculas de substâncias húmicas na água é grande, em virtude da densidade de carga procedente dos grupos funcionais ácidos. A qualidade da água é afetada pela presença de substâncias húmicas, as quais reagem durante o tratamento de água para formar trihalometanos. Dessa maneira, a principal consequência da pré-ozonização de substâncias húmicas é o decréscimo da

densidade de carga coloidal destes compostos (FARVARDIN & COLLINS (1989)).

#### b) Detergentes

DI BERNARDO<sup>11</sup> apud DI MATTEO (1992) expressa que os detergentes orgânicos são dos seguintes tipos: alquil-sulfonatos, alquil-benzeno sulfonatos lineares e compostos amino quaternários alifáticos. O autor informa que tem sido relatado que compostos contendo agrupamentos aromáticos são mais facilmente oxidados pelo ozônio. Todavia, quando tais compostos possuem grupos do ácido sulfônico, a oxidação pelo ozônio torna-se mais difícil.

#### c) Fenóis

De acordo com DI BERNARDO<sup>11</sup> e RICHARD<sup>5</sup>, citados por DI MATTEO (1992), o ozônio oxida rapidamente os fenóis e outros compostos que ainda contêm o anel aromático. Em seguida, a ozonização rompe os anéis aromáticos com eventual produção de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O (5 moles de O<sub>3</sub> por mol de fenol). A oxidação do fenol inicia-se com a formação de compostos di-hidroxiaromáticos, tri-hidroxiaromáticos e quenônios. Posteriormente, com a quebra dos anéis aromáticos, há formação de ácidos alifáticos, sendo o ácido oxálico, o mais estável.

#### d) Pesticidas

Consoante verificações feitas por DI BERNARDO<sup>11</sup>, os pesticidas reagem de forma completamente desigual com o ozônio. Por exemplo, Aldrin e Fosalone são rapidamente destruídos com pequenas dosagens de ozônio. Por sua vez, DDT, PCBs, BHC e Clordano, são ligeiramente reativos com o ozônio (alguns destes pesticidas, como o DDT e o BHC não são mais fabricados). Malation e Paration representam os dois únicos casos de pesticidas que podem ser oxidados e destruídos pelo ozônio.



#### ④ Remoção de turbidez

NEBEL (1981) aclara que a turbidez presente na água é removida pela ozonização através de uma combinação entre a oxidação química e a neutralização de cargas. Em acordo com o autor, partículas coloidais, as quais causam turbidez, são mantidas em suspensão por partículas carregadas negativamente, que são neutralizadas pelo ozônio. Este promove a destruição de materiais coloidais pela oxidação de compostos orgânicos que predominam na superfície das partículas coloidais esféricas.

FARVARDIN & COLLINS (1989) reportam que as alterações da turbidez são resultados de mudanças na distribuição do tamanho das partículas. Segundo RICHARD<sup>5</sup>, os mecanismos de melhora na remoção da turbidez pelo ozônio sucedem-se devido ao ozônio reduzir o efeito da proteção do colóide pela modificação da absorção de organismos naturais.

#### ⑤ Remoção de cor

NEBEL (1981) corrobora que as águas superficiais são geralmente coloridas naturalmente pela ocorrência de materiais orgânicos como, por exemplo, ácidos húmicos e fúlvicos e contêm, geralmente, sólidos em suspensão, os quais causam a variação de níveis de coloração das águas.

O autor confirma que tais compostos orgânicos resultam da degradação de vegetais e, em geral, são relacionados com produtos de condensação de compostos como os fenólicos. Esses compostos, causadores de cor, incluem numerosas ligações duplas conjugadas, as quais são rapidamente rompidas pela oxidação com o ozônio.

FRANCISCO<sup>6</sup> apud DI MATTEO (1992), em testes efetuados com água do rio Negro, Manaus, Amazonas, obteve uma remoção de 90 % da cor aparente com a pré-ozonização e subsequente filtração. Utilizando diferentes dosagens de ozônio nas águas do rio do Baixo Cotia, situado na região metropolitana de São Paulo, que recebe efluentes de vários tipos de indústrias, o pesquisador verificou que a pré-ozonização reduziu a cor aparente de 80 para 0,18 uPtCo. Resultados positivos para remoção de cor

aparente também foram encontrados na estação de tratamento de Manta, Equador, apresentando, em um dos ensaios realizados, cor aparente inicial de 350 uPtCo, que foi reduzida para 200 uPtCo após a pré-ozonização, chegando a 2,5 uPtCo no efluente da filtração.

#### ⑥ Desinfecção primária

O ozônio é um forte bactericida e virucida. A desinfecção com o ozônio sobrevém do rompimento da célula ou ruptura da parede da célula do microrganismo (NEBEL (1981)). O autor atesta que o ozônio é um forte germicida, em que são necessárias somente algumas microgramas por litro para medir a sua ação.

De acordo com o autor, água que contém bactérias quase sempre possui material orgânico dissolvido, que manifesta uma demanda inicial de ozônio. Em alguns casos raros, espécies inorgânicas podem também exercer uma demanda inicial de ozônio. Enquanto esta demanda está sendo satisfeita, a taxa de desinfecção é relativamente lenta e o ozônio consegue destruir alguns microrganismos enquanto reage com materiais orgânicos na água. Após esta demanda ser satisfeita, a taxa de destruição é muito rápida.

Segundo DI MATTEO (1992), embora o principal objetivo da pré-ozonização não seja exatamente a desinfecção, o ozônio pode ser utilizado para auxiliar na remoção de bactérias e inativação de vírus. Entretanto, com amostras dos efluentes de filtros lentos, antes da desinfecção por cloro, LIANG et al. (1989) detectaram coliformes e bactérias heterotróficas, sugerindo que a ozonização produziu compostos orgânicos biodegradáveis que enriqueceram a atividade biológica nos filtros. Isso pode ter ocorrido, em parte, pela presença de maiores concentrações de oxigênio na água ozonizada do que na água não ozonizada. Os autores constataram, ainda, que, após a desinfecção com o cloro, no processo final do tratamento, ocorreu a remoção destes microrganismos, com substancial redução na contagem de bactérias, que se apresentou maior em água ozonizada.



NEBEL (1981) descreve que a frequência da hepatite infecciosa nos EUA tem permanecido num nível estável de 50.000 a 60.000 casos por ano e, a incidência de febre tifóide caiu de 2.000 casos em 1955, para 300 em 1968. Estas estatísticas, segundo o autor, indicam que, embora as doenças de origem hídrica pelas bactérias tenham sido controladas, o mesmo não ocorreu com as infecções virais. O único padrão aceitável para o residual de vírus é zero. A cloração, como é utilizada nas estações de tratamento, pode não remover estes microrganismos a níveis aceitáveis. O autor acredita que a utilização do ozônio venha minorar este problema, uma vez que o controle completo de vírus pelo ozônio, à baixa dosagem, é bem documentado. O pesquisador acrescenta que a taxa de inativação viral pelo ozônio é mais rápida que a taxa de inativação de bactérias.

#### ⑦ Trihalometanos

DI MATTEO (1992) científica que quantidades de traços de materiais orgânicos que estão dissolvidos em água tratada reagem quimicamente com cloro para produzir trihalometanos (THM). Estes compostos são carcinogênicos e, segundo a Agência de Proteção ao Meio Ambiente dos Estados Unidos da América (USEPA), a concentração máxima admitida é de 0,1 mg/L.

A USEPA efetuou um levantamento das condições de potabilidade da água tratada em 80 cidades americanas e detectou THM em quase todas. Em duas delas, uma apresentando baixo índice de THM e a outra com índice zero de THM, é empregado o ozônio como parte do processo de tratamento. Nas águas do Lago Michigan, nas quais foram detectados traços de THM, a água é pré-ozonizada e pós-clorada. No caso em que não foi detectado THM, a água era desinfetada com ozônio (NEBEL (1981)).

Segundo o autor, o controle de THM pode ser efetivo por um dos três mecanismos: (i) remoção de THM após serem formados; (ii) remoção de compostos orgânicos dissolvidos na água a ser desinfetada e (iii) não utilizar o cloro como desinfetante. Na maioria dos casos, não se elimina o cloro,

porque é necessária a existência de residual do desinfetante nas linhas de distribuição de água. A meia vida do ozônio em água livre de demanda de oxidante é de apenas 20-40 minutos, na temperatura ambiente, não possibilitando o seu uso como residual.

Conforme o autor, a remoção de precursores de trihalometanos pode ser realizada por três diferentes técnicas de oxidação: (i) a adição de baixas dosagens de ozônio na água afluyente ao tratamento, auxiliando a coagulação e subseqüentemente, a remoção de precursores; (ii) a aplicação do ozônio em uma das últimas unidades do processo de tratamento, ocorrendo, desta maneira, oxidação dos precursores remanescentes da formação de THM, devendo-se ter muitas precauções quando altas concentrações de compostos orgânicos permanecerem na água, pois a oxidação parcial destes pode alterar suas estruturas, de tal forma que levam à produção de mais THM após ulterior cloração e (iii) a combinação de carvão ativado granular com o ozônio para produzir carvão biologicamente ativado.

Testes realizados por LIANG et al. (1989) com água bruta natural que não apresentava THM, demonstraram, em amostras de efluentes da filtração direta de água pré-clorada, um valor de 41,4 µg/L para THM total (TTHM) e, com a pós-cloração, esta concentração aumentou para 52,2 µg/L. Quando a pré-ozonização foi aplicada, o efluente do processo de tratamento, após a cloração, apresentou uma concentração de 11,73 µg/L de TTHM.

### ③ Subprodutos

DI MATTEO (1992) assevera que alguns trabalhos têm demonstrado que o ozônio pode formar subprodutos na água, tais como:

#### □ Aldeídos

GLAZE et al. (1989) foram uns dos que observaram que, em água bruta natural, que não continha aldeídos, a pré-ozonização levou à formação destes compostos, cujos níveis se reduziram, após a filtração. De acordo



com DI MATTEO (1992), os aldeídos são formados pela reação direta do ozônio com precursores, como os ácidos graxos não saturados. A decomposição do ozônio pode retardar a formação dos aldeídos. A autora ainda menciona que os formaldeídos podem ser produzidos pela oxidação de espécies como aminoácidos ou aromáticos, contidas nas substâncias húmicas (precursores de THM).

#### □ Peróxido de hidrogênio e peróxidos orgânicos

LIANG et al. (1989) detectaram a formação de peróxido de hidrogênio, após a pré-ozonização, decorrentes de reações diretas e indiretas do ozônio com compostos orgânicos. Não foram encontrados residuais destes compostos após a filtração nem no final do processo de tratamento. Por sua vez, os peróxidos orgânicos não foram detectados em nenhum ponto de coleta das amostras, ao longo das unidades de tratamento.

#### □ Brometos

De acordo com DI BERNARDO<sup>11</sup> apud DI MATTEO (1992), a presença simultânea de precursores de THM e de brometos na água ozonizada, pode causar a interação entre os três reagentes. A primeira reação que ocorre é a ação do ozônio sobre os brometos, com formação de ácido hipobromoso, em equilíbrio com o íon hipobromito (dependendo do pH). Quando há excesso de ozônio, pode haver formação de bromatos e hipobromitos. Segundo o autor, o ozônio pode também oxidar os precursores de THM. Se a taxa de reação de oxidação dos precursores é maior que a de formação de ácido hipobromoso ou a de bromofórmio, os precursores serão rapidamente degradados pelo ozônio, não ocorrendo a formação de bromofórmio, exceto se a oxidação do próprio precursor resultar num THM. Todavia, se a taxa de degradação do precursor pelo ozônio for lenta, comparada à formação de bromofórmio, pode ser observada a presença de bromofórmio durante a ozonização. Adicionalmente, o autor relata que há a influência da formação de THM na presença de brometos, quando a água possui maior ou menor concentração

de fosfatos e bicarbonatos (efeito tampão). Quanto maior a concentração de bicarbonatos e fosfatos, menor resulta a formação de bromofórmio quando há precursores de THM na água a ser ozonizada.

### 3.3.7. Pós-ozonização

DI MATTEO (1992) expõe que, embora não seja recente, na pós-desinfecção, a ozonização é usada para remover microrganismos indicadores de contaminação fecal. As duas maiores limitações do ozônio para a desinfecção final podem estar relacionadas à sua instabilidade na água, com vida média muito curta para assegurar uma capacidade residual desinfetante em grandes sistemas de distribuição e, à formação de subprodutos oxigenados de baixo peso molecular, através da reação com substâncias orgânicas que são geralmente mais biodegradáveis, promovendo crescimento biológico no sistema de distribuição. Por esta razão, a autora informa que o ozônio deve ser utilizado em combinação com outros desinfetantes, para manter um residual ativo por longos períodos.



## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Considerações iniciais

O presente estudo abrangeu a investigação da influência da pré-ozonização (antecedendo a mistura rápida) sobre a eficiência da flotação do efluente de um reator anaeróbio de chicanas tratando esgoto sanitário. Foram testados diversos valores de pH e respectivas dosagens de alcalinizante, acidulante, coagulante e oxidante.

Todos os ensaios foram efetuados empregando-se equipamentos em escala de laboratório com alimentação por batelada (*tipo batch*), como *Flotateste* para a flotação, *Jar-test* para a mistura rápida, gerador de ozônio (alimentado com oxigênio “puro”) e colunas de ozonização.

O esquadramento dos efeitos da pré-ozonização na flotação envolveu inicialmente o desenvolvimento de metodologia apropriada para ensaios de ozonização em batelada. Vários testes preliminares foram efetuados com a finalidade de se conhecer: a quantidade de ozônio produzida pelo aparelho gerador, o tempo de aplicação do ozônio na câmara de contato necessário para se obter a dosagem desejada e a aplicabilidade do método de determinação do residual de ozônio para a água de estudo (fase gasosa e no meio líquido).

O trabalho em questão foi distribuído em quatro etapas. Na primeira delas, a partir de três dosagens pré-fixadas do oxidante ozônio, variaram-se, para cada uma, três dosagens do coagulante cloreto férrico, testando-se, para todas elas, uma série de valores de pH, controlados por hidróxido de cálcio (cal) e ácido clorídrico.

Os diferentes valores das dosagens de coagulante e pH foram baseados em estudo anterior (conforme proposto por PENETRA (1998)). Nesta fase inicial, preocupou-se, basicamente, em analisar a influência do pH e da dosagem do coagulante na ozonização, sem levar em conta, à primeira instância, as alterações diárias do afluente e conseqüente efluente do reator anaeróbio.

Assim, de posse dos resultados obtidos com a primeira etapa desta pesquisa, pôde-se ter início ao conhecimento do comportamento do ozônio diante dos parâmetros utilizados na flotação para o presente estudo. Desta feita, uma segunda fase de ensaios foi programada. Nesta nova situação experimental, o que se fez foi fixar as quatro dosagens do coagulante e, para todas elas, investigar as quatro dosagens de ozônio com quatro valores de pH cada uma. No entanto, desta vez, os valores de pH utilizados basearam-se em análises conclusivas da etapa anterior. Destaca-se ainda, que houve o cuidado em se trabalhar com um mesmo tipo de água, ou seja, dadas as variações costumeiras das características dos afluentes domésticos, preocupou-se em se realizar durante um único dia, todos os ensaios correspondentes a uma única dosagem de coagulante. Esta atenção especial com a uniformidade da água de estudo, deve-se ao fato de se aumentar, deste modo, a confiabilidade dos resultados e, conseqüentemente, conclusões mais seguras, uma vez que o caráter oxidante do ozônio é extremamente vulnerável a alterações do produto a ser oxidado.

A terceira fase de estudos foi criada e refinada com bases no exame minucioso dos valores resultantes de cada variável determinada em laboratório a partir das amostras obtidas dos ensaios anteriores. O que se fez foi escolher o pH e a dosagem de ozônio que proporcionavam as melhores remoções de todos os parâmetros envolvidos. Dessa maneira, fixando-se o valor do pH selecionado, variou-se a dosagem de coagulante (três dosagens, além da dosagem nula) e, para cada uma delas, testou-se a dosagem de oxidante ótima e a dosagem nula. O mesmo se fez para o pH



natural da água, a fim de se possibilitar comentários e conclusões posteriores de ordem prática.

Finalmente, procedendo-se à análise do produto final oriundo do terceiro estágio de estudos, promoveu-se a elaboração da quarta e última etapa, em que foram repetidas as condições dos melhores ensaios anteriormente executados. A diferença é que foi eliminada a dosagem nula de coagulante e foi realizada uma análise mais apurada das amostras.

Exames concernentes a coliformes totais e fecais foram efetuados à parte, levando-se em conta as influências do ozônio e da flotação separadamente, bem como conjuntamente.

É importante informar que, em todas as fases de ensaios deste trabalho, foram aplicadas as seguintes condições operacionais:

⇒ Mistura rápida:

Gradiente médio de velocidade:  $550 \text{ s}^{-1}$ ;

Tempo: 1 min.

⇒ Flocculação:

Gradiente médio de velocidade:  $60 \text{ s}^{-1}$ ;

Tempo: 20 min.

⇒ Flotação por ar dissolvido:

Recirculação: 18 %, em volume;

Pressão de saturação:  $450 \pm 10 \text{ kPa}$ .

Na FIGURA 5 apresenta-se um diagrama ilustrativo das etapas de estudo realizadas no decorrer do presente estudo.

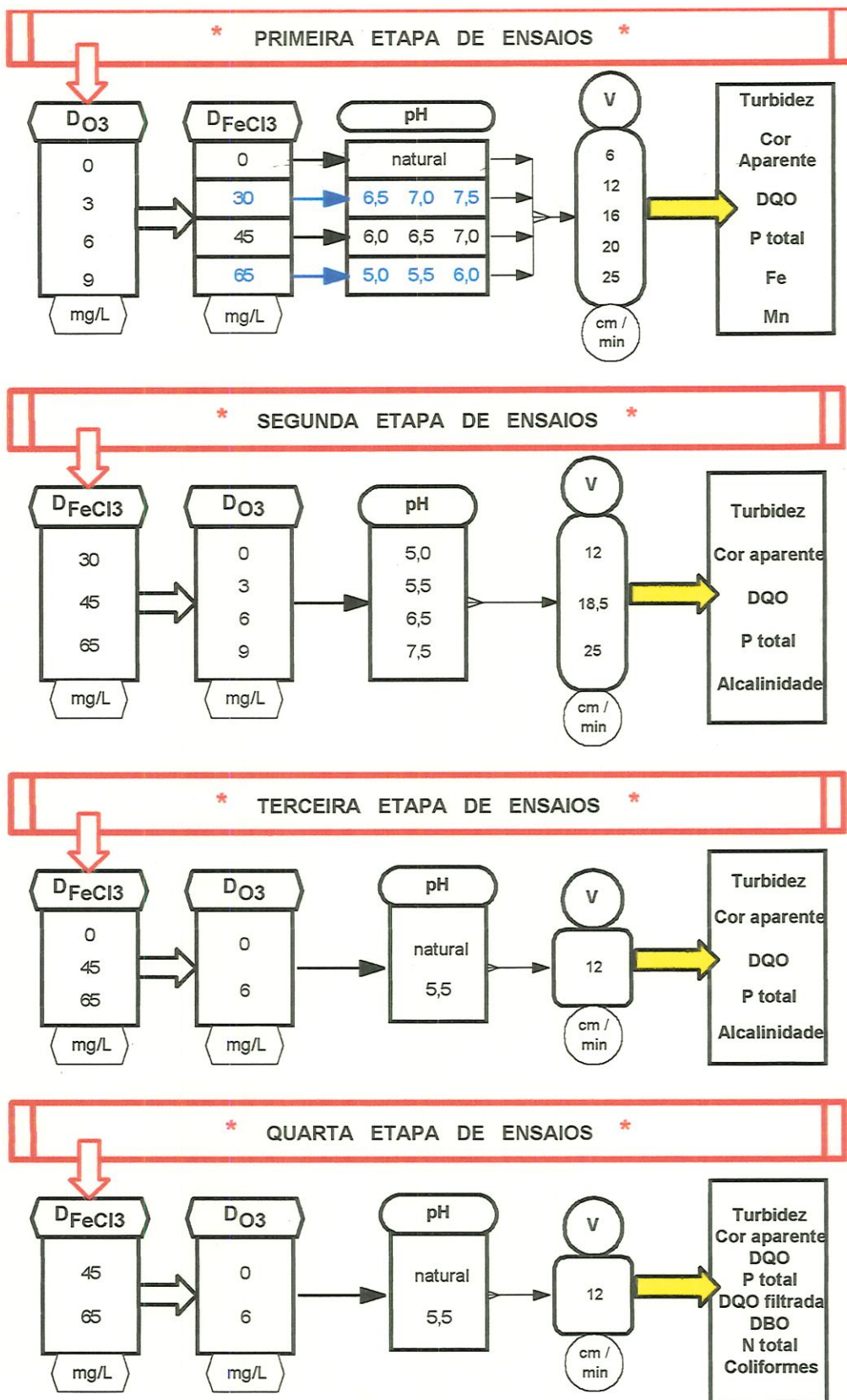


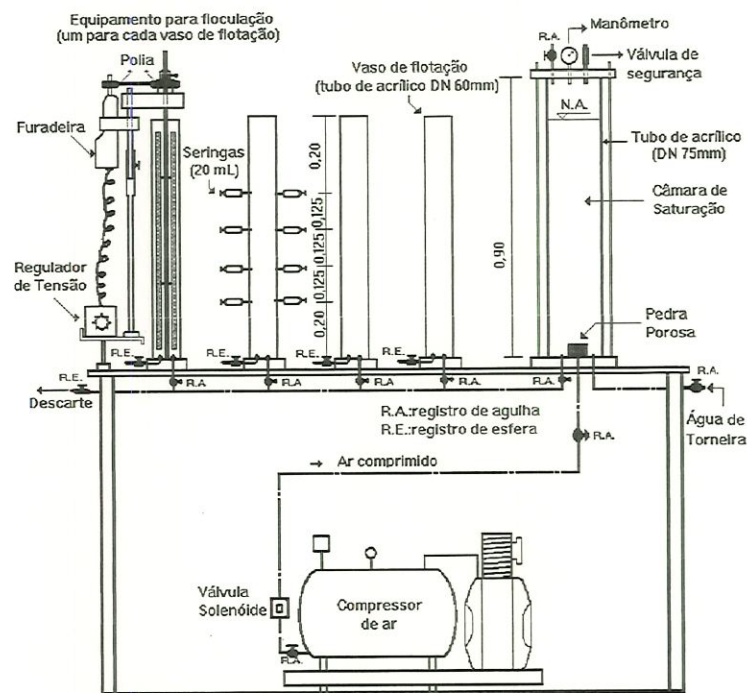
FIGURA 5 - DIAGRAMA ILUSTRATIVO DAS ETAPAS DE ESTUDO



## 4.2. Descrição das instalações utilizadas

### 4.2.1. Instalação de FAD em escala de laboratório (flotateste)

A instalação de flotação por ar dissolvido em escala de laboratório (flotateste) é constituída de quatro câmaras de flotação operadas em paralelo, alinhadas por uma única câmara de saturação, conforme mostrado na figura abaixo:



Obs.: medidas em metros.

**FIGURA 6 - Unidade de flotação em escala de laboratório (flotateste). Fonte: REALI et al. (1995).**

As câmaras de flotação são operadas em regime de fluxo descontínuo (*batch*). Assim, após promover-se a mistura rápida no aparelho *Jar-test*, com a devida correção do pH e adição do coagulante na dosagem escolhida, enche-se os frascos com a água de estudo e liga-se o agitador para se efetuar a mistura lenta ou flocação. Cada um dos frascos de flotação conta com um agitador próprio, o qual está ligado a um regulador de tensão para controle da rotação, ou seja, para controle da energia fornecida

para a floculação. Cada equipamento de agitação é impulsionado por meio de um motor elétrico acoplado adequadamente ao sistema.

Paralelamente, efetua-se a aeração do volume de água armazenado no interior da câmara de saturação. Terminado o período de floculação, abrem-se as válvulas que controlam a entrada da recirculação pressurizada proveniente da câmara de saturação, promovendo-se a flotação dos flocos em suspensão presentes na câmara de saturação. A coleta de amostras é realizada com auxílio de seringas (20 ml) colocadas em pontos situados em posições adequadas ao cálculo das curvas de distribuição de velocidades de flotação (curvas de flotação) conforme metodologia proposta por REALI (1991).

#### **4.2.2. Colunas de ozonização**

O conjunto de geração de ozônio utilizado é composto (vide FIGURA 7) de: cilindro de oxigênio, unidade geradora do ozônio (tipo residencial), coluna de medição da produção (para o controle do ozônio aplicado), coluna de contato e sistema de coleta e destruição do excesso de gás ozônio das colunas de contato e produção. O controle de distribuição do gás entre as colunas foi realizado por meio de dois registros de agulha instalados na parte inferior das mesmas.

No cilindro de oxigênio utilizado para a geração de ozônio está conectada uma mangueira ligada a um rotâmetro que controla a vazão de gás que entra no ozonizador. A pressão de saída do oxigênio do cilindro foi limitada a  $1,5 \text{ kg/cm}^2$  e a pressão de entrada deste gás no ozonizador foi sempre de  $0,6 \text{ kg/cm}^2$  (valor estimado pela escala do rotâmetro), com vistas a facilitar a operação.

A câmara de contato é de seção cilíndrica, construída em PVC, com diâmetro interno de  $1 \frac{1}{2}$ " (3,8 cm) e altura total de 1,85 m. À sua base está conectada uma pedra porosa para a difusão do ozônio, ligada a uma mangueira de entrada do gás. Paralelamente a essa mangueira, existe uma



outra, responsável pela coleta da água de estudo ozonizada e, por vezes, para o descarte da água de limpeza do sistema. A câmara de medição da produção de ozônio foi construída identicamente à câmara de contato.

O excesso de gás (*off gas*) não retido na câmara de contato é levado através de uma mangueira conectada ao topo da mesma a um sistema constituído por três erlenmeyers (500 ml) vedados por rolhas e interligados por tubos de silicone presos a elas e contendo, cada um deles, 400 ml de solução de iodeto de potássio a 2%. Esse sistema permitiu a remoção total da concentração residual de ozônio contida no efluente gasoso.

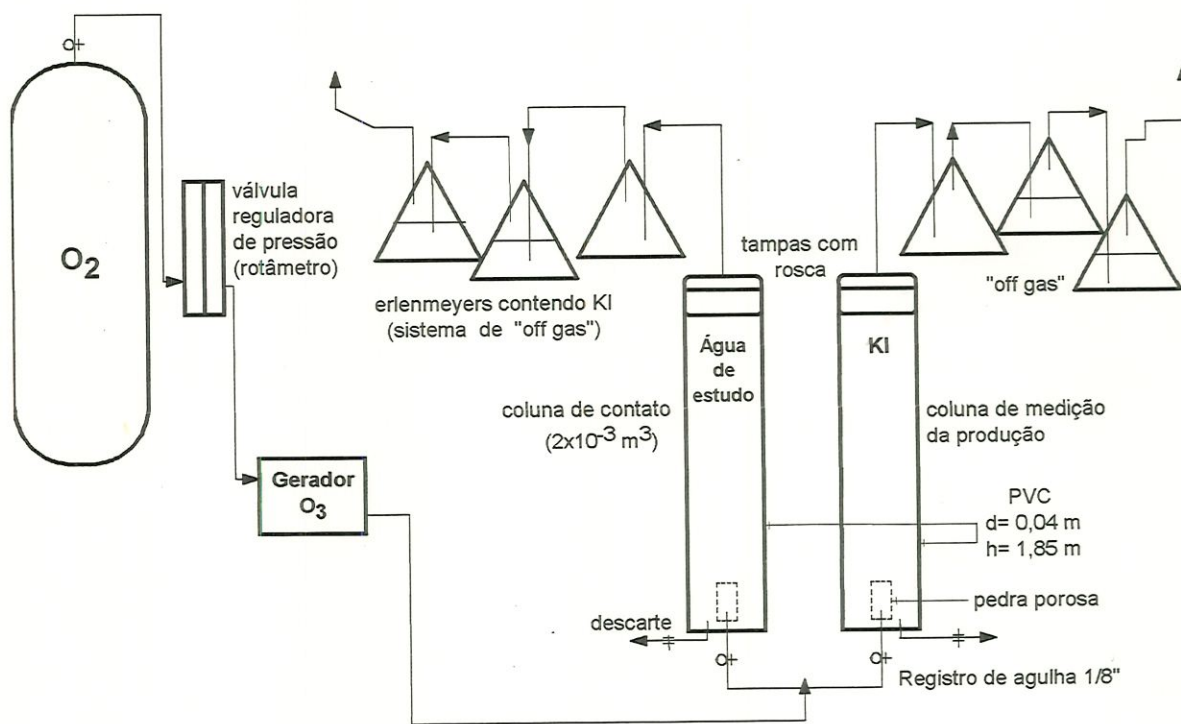


FIGURA 7 - ESQUEMA DO CONJUNTO DE OZONIZAÇÃO

### 4.2.3. Reator anaeróbio com chicanas

A água de estudo (esgoto) utilizada no presente trabalho provém de um reator anaeróbio com chicanas tratando esgoto doméstico. De acordo com POVINELLI (1994), este reator dispõe de diversas chicanas verticais, interligadas por tubulações que distribuem o líquido de uma para outra. O líquido apresenta movimentos ascendentes e descendentes dentro do reator, atravessando regiões com elevada concentração de microrganismos ativos, que se formam no interior do reator.

O reator foi executado em concreto armado, com aproximadamente 11 m<sup>3</sup> de volume, com divisões em compensado naval tratado, que constituem as chicanas, formando um total de 4 câmaras que funcionam como reatores. O efluente de uma câmara serve como afluente da outra subsequente.

O reator é alimentado com esgoto sanitário proveniente da rede pública e está submetido a gradeamento preliminar. A seguir, o afluente circula através das câmaras (três primeiras), e finalmente entra na última câmara, passando por um leito grosseiro de pedregulho nela instalado.

Cada uma das três primeiras câmaras possui três pontos de coleta de amostras com tubulação de 3/4", junto a uma das paredes do reator. Estes pontos de coleta estão localizados respectivamente a 30, 100 e 160 cm do fundo e permitem verificar posteriormente as características do lodo, líquido intermediário e efluente de cada câmara. Estas três câmaras também possuem descarga de fundo de 50 mm que descarrega na rede coletora pública e serve para descarte do lodo formado no reator.

Na última câmara, a coleta é feita junto ao fundo (descarga de fundo) e após a passagem pelo leito de pedregulho na parte superior, o efluente tratado é então coletado a 40 cm da tampa, através de uma única tubulação de 75 mm. Este efluente passa por pequena caixa de concreto, de onde é possível proceder à sua recirculação, se necessário. Esta caixa está ligada à rede coletora municipal.

Para se obter maiores informações a respeito do reator anaeróbio com chicanas, consultar POVINELLI (1994).





### 4.3. Ensaios preliminares à pré-ozonização

#### 4.3.1. Considerações iniciais

Nessa fase foram efetuados vários ensaios preliminares de ozonização da água de estudo, com a finalidade de avaliar o seu comportamento sob pós-tratamento com ozônio. Os parâmetros de controle desses ensaios foram:

- ⊗ produção do gás ozônio;
- ⊗ tempo de aplicação do ozônio na câmara de contato;
- ⊗ aplicabilidade do método de determinação do residual de ozônio.

#### 4.3.2. Método para determinação do ozônio na fase gasosa

##### 4.3.2.1. Determinação da produção do aparelho gerador de ozônio

O método adotado para a determinação da produção de ozônio foi o método iodométrico (Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater, 19<sup>th</sup> ed.). A razão de se obter este valor é conhecer, em função da variável tempo, a dosagem de ozônio aplicada na coluna de contato. Vale ressaltar que a determinação da produção do aparelho gerador de ozônio deve levar em conta a parcela referente ao excesso do gás proveniente da coluna de contato.

O procedimento utilizado pode ser descrito da seguinte forma:

##### A) Parcela referente à coluna de contato:

- ① Despeja-se na coluna de produção um volume de 2,0 L de solução de iodeto de potássio (KI) a 2%. Durante um tempo pré-fixado, borbulha-se o gás ozônio através da coluna;
- ② Decorrido o período de ozonização, fecha-se o registro de entrada do gás, solta-se a seringa da mangueira coletora e recolhe-se uma amostra de 200 ml. Vale lembrar que, antes de soltar a seringa coletora, deve-se

desconectar a mangueira superior, que une a coluna ao primeiro erlenmeyer, para impedir que o conteúdo deste e dos demais, seja sugado para o interior da coluna e misture-se com o líquido lá existente;

- ③ O volume amostral de 200 ml é imediatamente fixado com 4 ml de solução de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) 1N e protegido contra a incidência da luz ambiente;
- ④ Titula-se a amostra com solução de tiosulfato de sódio ( $Na_2S_2O_3$ ) 0,025 N até que adquira uma coloração amarelo-palha;
- ⑤ Adiciona-se 2 ml de solução indicadora de amido, o que torna a amostra azulada;
- ⑥ Continua-se a titulação com o tiosulfato de sódio, até que a cor azul desapareça totalmente;
- ⑦ Anota-se o volume total de tiosulfato gasto e parte-se para o cálculo da produção (parcial) de ozônio;
- ⑧ Determinação da produção parcial  $\rightarrow P_1$  (g/h  $O_3$ ):

$$P_1 = \frac{N_{Na_2S_2O_3} \times \Delta V_{Na_2S_2O_3} \times V_{KI} \times 24000 \times 60}{V_{am} \times t \times 1000}$$

onde:

- $N_{Na_2S_2O_3}$  = normalidade do tiosulfato de sódio;
- $\Delta V_{Na_2S_2O_3} = Va_{Na_2S_2O_3} - Vb_{Na_2S_2O_3}$

sendo:

$Va_{Na_2S_2O_3}$  = volume de tiosulfato consumido na titulação da amostra, em ml;

$Vb_{Na_2S_2O_3}$  = volume de tiosulfato consumido na titulação do branco, em ml;

- $V_{KI}$  = volume total de iodeto de potássio ozonizado, em L (= 2L);
- $V_{am}$  = volume da amostra de iodeto de potássio titulada, em ml (= 200 ml);
- $t$  = tempo cronometrado durante a aplicação do ozônio, em minutos.

Simplificando:

$$P_1 = \frac{N_{Na_2S_2O_3} \times \Delta V_{Na_2S_2O_3} \times 14,4}{t}$$



⑨ Determinação da dosagem parcial de ozônio aplicada  $\rightarrow D_{O_{31}}$  (mg/L  $O_3$ ):

$$D_{O_{31}} = \frac{P_1 \times t \times 1000}{V_{KI} \times 60}$$

onde:

- $P_1$  = produção de ozônio, na coluna, em g/h;
- $t$  = tempo de aplicação do ozônio, em minutos;
- $V_{KI}$  = volume total de iodeto de potássio ozonizado, em L (= 2L).

Simplificando:

$$D_{O_{31}} = \frac{P_1 \times t \times 25}{3}$$

**B) Parcela referente ao excesso de ozônio liberado pela coluna de contato:**

① Determinação do excesso de gás ozônio (*off gas*):

As fases ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦, anteriores, são repetidas para esta determinação.

A única alteração feita refere-se ao volume de solução de iodeto de potássio que, de 2L, passa a ser de 0,8L.

Aqui, vale fazer uma ressalva, muito particular, a respeito da escolha desse volume de 0,8L. Durante os primeiros testes do sistema montado com a água de estudo, verificou-se que, ao borbulhar o ozônio pela coluna, muita espuma era formada, em função da presença abundante de detergentes no efluente do reator anaeróbio. Esta espuma atravessava a mangueira de ligação entre a coluna e o primeiro erlenmeyer e misturava-se ao volume de KI nele presente. Para sanar o problema, estipulou-se que o primeiro erlenmeyer ficaria vazio, servindo apenas para recolher a espuma excedente. Tal fato, em nada afetaria os ensaios. Assim, apenas o segundo e o terceiro erlenmeyer conteriam solução de KI. Para que o sistema de ozonização ficasse simétrico, o mesmo cuidado foi tomado com a coluna de produção. Dessa forma, foi estabelecido um volume de 400 ml por erlenmeyer, perfazendo um volume total de solução de iodeto de potássio (2%) de 800 ml.

② Cálculo da segunda parcela referente à produção  $\Rightarrow P_2$  (g/h  $O_3$ ):

$$P_2 = \frac{N_{Na_2S_2O_3} \times \Delta V_{Na_2S_2O_3} \times V_{KI} \times 24000 \times 60}{V_{am} \times t \times 1000}$$

onde:

- $N_{Na_2S_2O_3}$  = normalidade do tiosulfato de sódio;

- $\Delta V_{Na_2S_2O_3} = V_{a_{Na_2S_2O_3}} - V_{b_{Na_2S_2O_3}}$

sendo:

$V_{a_{Na_2S_2O_3}}$  = volume de tiosulfato consumido na titulação da amostra, em ml;

$V_{b_{Na_2S_2O_3}}$  = volume de tiosulfato consumido na titulação do branco, em ml;

- $V_{KI}$  = volume total de iodeto de potássio ozonizado, em L (= 0,8 L);

- $V_{am}$  = volume da amostra de iodeto de potássio titulada, em ml (= 200 ml);

- $t$  = tempo cronometrado durante a aplicação do ozônio, em minutos.

Simplificando:

$$P_2 = \frac{N_{Na_2S_2O_3} \times \Delta V_{Na_2S_2O_3} \times 5,76}{t}$$

③ Determinação da dosagem de ozônio liberada pela coluna de contato (mg/L  $O_3$ ):

$$D_{O_3_{off}} = \frac{P_2 \times t \times 1000}{V_{KI} \times 60}$$

onde:

- $P_2$  = produção de ozônio em excesso, em g/h;

- $t$  = tempo de aplicação do ozônio, em minutos;

- $V_{KI}$  = volume total de iodeto de potássio ozonizado, em L (= 0,8 L).

Simplificando:

$$D_{O_3_{off}} = \frac{P_2 \times t \times 125}{6}$$

C) Determinação da produção total de ozônio (g/h):

$$P_{total} = P_1 + P_2$$



**D) Determinação da dosagem total de ozônio aplicada no sistema (mg/L):**

$$D_{O_3\text{total}} = D_{O_3\text{i}} + D_{O_3\text{off}}$$

#### **4.3.3. Metodologia para a determinação do ozônio na fase líquida**

Para a determinação do ozônio na fase líquida (residual), optou-se pela utilização do método iodométrico (método também utilizado para a determinação do cloro residual) descrito no “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (19<sup>th</sup> Ed.)”. Vale observar que não foi possível, no presente trabalho, utilizar o método colorimétrico, recomendado pelo Comitê de Padronização Europeu (1987), aprovado pela Associação Internacional de Ozônio e descrito no “Standard Methods”, na sua última edição, para esta determinação, uma vez que dois dos reagentes empregados deveriam ser importados e levariam muito tempo para chegar ao Brasil (aproximadamente 4 meses).

Dessa forma, realizou-se uma investigação esmerada do comportamento da água de estudo (efluente do reator anaeróbio que se torna o afluente do atual sistema) ozonizada no interior da coluna de contato, através da definição do residual de ozônio nesta água. Para tanto, foram efetuados inúmeros ensaios alterando-se os tempos de contato.

##### **4.3.3.1. Determinação do residual de ozônio – método iodométrico**

Conhecida a produção do aparelho gerador de ozônio por metodologia descrita anteriormente, pôde-se calcular o tempo necessário de ozonização para se obter a desejada dosagem a ser aplicada (os resultados desses ensaios poderão ser conferidos no Capítulo 5).

Dando-se início à análise do residual, escolheu-se, de todas as pretendidas dosagens a serem aplicadas nas diversas etapas da pesquisa, a que demandaria um maior tempo de ozonização, ou seja, a maior delas ( $D_{O_3} = 9$  mg/L). Se houvesse residual de ozônio para esta dosagem,

determinar-se-ia para as outras; caso contrário, não haveria a necessidade de tal. Para uma maior familiarização com o método e para testar sua sensibilidade, adicionalmente mediu-se várias vezes o residual de ozônio presente na água de estudo para um tempo de ozonização de 30 minutos.

Assim, o procedimento firmado foi o seguinte:

- ① Despeja-se na coluna de produção um volume de 2,0 L da água de estudo, devidamente coletada do reator anaeróbio e homogeneizada. Durante um tempo pré-fixado, borbulha-se o gás ozônio através da coluna;
- ② Decorrida a ozonização, fecha-se o registro de entrada do gás, solta-se a seringa da mangueira coletora e recolhe-se uma amostra de 200 ml;
- ③ O volume amostral de 200 ml é imediatamente fixado com solução de ácido sulfúrico 1N (5 ml, para se garantir um valor de pH abaixo de 2,0), adicionado a 1 g de KI e protegido contra a incidência da luz ambiente;
- ④ Titula-se a amostra com solução de tiosulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) 0,01 N até que se manifeste uma coloração amarelo-palha;
- ⑤ Adiciona-se 2 ml de solução indicadora de amido, ficando a amostra azulada;
- ⑥ Continua-se a titulação com o  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (0,01 N) até que a cor azul desapareça totalmente;
- ⑦ Anota-se o valor total de volume de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  gasto na titulação;
- ⑧ Cálculo do ozônio residual (mg/L):

$$R_{\text{O}_3} = \left( \frac{N_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times \Delta V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 35450}{V_{\text{am}}} \right) \times 0,68$$

onde:

- $N_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$  = normalidade do tiosulfato de sódio;
- $\Delta V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} = V_{\text{a}_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}} \pm V_{\text{b}_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}}$

sendo:

$V_{\text{a}_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}}$  = volume de tiosulfato consumido na titulação da amostra, em ml;

$V_{\text{b}_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}}$  = volume de tiosulfato consumido na titulação do branco, em ml;



📌 Titulação do branco:

Pega-se um volume de água destilada igual ao volume de amostra (200 ml). Adiciona-se 5 ml de solução de  $H_2SO_4$  (1N) + 1 g de KI. Titula-se, ao abrigo da luz ambiente, com  $Na_2S_2O_3$  (0,01 N) até a cor amarelo-palha surgir. Adiciona-se 2 ml de solução de amido. A amostra poderá ou não, ficar azulada.

- Se a amostra ficar azulada: titular com  $Na_2S_2O_3$  (0,01 N) até que o azul desapareça (neste caso,  $V_b$  será negativo);

- Se a amostra não ficar azulada: titular com solução de lodo (0,0282 N) até ficar azul. Continuar a titulação com  $Na_2S_2O_3$  (0,01 N) até ficar incolor ( $V_b$  será positivo).

- $V_{am}$  = volume da amostra titulada, em ml (= 200 ml);
- 0,68 = fator de conversão da fórmula, elaborada para o cloro e adaptada para o ozônio. Refere-se ao peso molecular:

$$Cl_2 = (35,4530) \times 2 = 70,9060 \quad \text{e} \quad O_3 = (15,9994) \times 3 = 47,9982$$

$$70,9060 \times X = 47,9982 \Rightarrow X \cong 0,68$$

Simplificando:

$$R_{O_3} = N_{Na_2S_2O_3} \times \Delta V_{Na_2S_2O_3} \times 0,12$$

📌 Observações importantes:

- Deve-se selecionar um volume de amostra a ser titulado que requeira não mais de 20 ml de  $Na_2S_2O_3$  (0,01 N) e não menos de 0,2 ml de solução indicadora de amido para a conversão da cor amarelo-palha para azul;
- Deve-se considerar coleta imediata;
- Embora exista a opção de se titular com solução de  $Na_2S_2O_3$  (0,025 N), é preferível utilizar a solução de  $Na_2S_2O_3$  (0,01 N), pois facilita a verificação do ponto de virada final;
- A diferença do método iodométrico quando utilizado para o cloro, é a de que para o cloro, a titulação com o tiosulfato pode ser feita a pH entre 3 e 4, uma vez que o cloro é capaz de liberar iodo livre de uma solução de iodeto de potássio sob valores de pH iguais a 8, ou menos. Já para o caso do ozônio, deve-se reduzir o valor do pH para abaixo de 2, pois é a faixa em que o ozônio se torna mais estável para se medir seu residual;

- No que tange à trabalhabilidade, o método iodométrico torna-se um tanto quanto impreciso no momento da verificação do ponto de virada total quando aplicado a águas residuárias, porquanto estas apresentam, geralmente, cor elevada, muitas vezes de matizes cinza-azuladas, fator que confunde com o tom azul-arroxeadado promovido pela solução indicadora de amido. Por conseguinte, após fixadas as amostras com o ácido sulfúrico, estas foram submetidas à centrifugação durante 20 minutos, a fim de se facilitar a visualização da transformação de cores durante a titulação.

#### **4.4. Ensaios referentes à primeira etapa do presente estudo**

Esta fase inicial de ensaios objetivou, principalmente, o conhecimento geral do comportamento da água de estudo diante das diferentes dosagens de ozônio aplicadas, uma vez que não se sabia, exatamente, o que ocorreria de fato com as características do efluente anaeróbico ao ser oxidado.

Para tanto, como uma estimativa prévia, baseou-se em dados experimentais de estudo realizado anteriormente por PENETRA (1998) sobre o emprego da flotação no pós-tratamento de reator anaeróbico do tipo UASB. Seja dito de passagem que, a princípio, este reator também deveria ser o fornecedor da água de estudo para o presente trabalho. Todavia, problemas estruturais graves danificaram-no, tornando-o ineficiente à sua função. Por essa razão, optou-se pela utilização do efluente do reator anaeróbico de chicanas, que operava normalmente nesta época.

Dessa feita, nesta fase primordial, o que se almejava investigar era, para uma dada dosagem de oxidante, o que ocorreria se se alterasse dosagens de coagulante e pH. Estes valores iniciais de coagulante e pH adotados, foram então extraídos do mencionado estudo de PENETRA (1998). Ressalva-se que, para este primeiro estágio de ensaios, não se levou em conta as alternâncias diárias das características do afluente e conseqüente efluente do reator.



Planejou-se que os ensaios seriam realizados todas as terças-feiras, durante 4 semanas, com coleta da água de estudos efetuada às 9 horas da manhã. A escolha deste dia da semana se deve ao fato de ser um dia comum, cuja véspera, a segunda-feira também o era e, portanto, o efluente do reator seria, teoricamente, característico de um dia normal. Poderia ser escolhida a quarta-feira, ou a quinta, ou a sexta. Mas, para facilitar as análises posteriores em laboratório, chegou-se à conclusão de que a terça-feira era realmente o melhor dia da semana para se trabalhar. O horário correspondente às 9 horas da manhã também é devido à melhor caracterização da água de estudo e, ainda, favorável ao tempo diário de trabalho.

A FIGURA 8 contém um esquema resumido de todos os ensaios feitos nesta etapa. Vale destacar que se trabalhava com uma dosagem de ozônio por terça-feira. Assim sendo, para cada dia de experimentos, fixava-se uma dosagem de ozônio ( $D_{O_3}$ : 0, 3, 6, 9 (mg/L)) e estudava-se quatro variações de dosagem de coagulante cloreto férrico ( $D_{FeCl_3}$ : 0, 30, 45, 65 (mg/L)), cada uma delas com diferentes valores de pH (pH natural e pH entre 5,0 e 7,5).

Assim, de posse dos resultados obtidos com a primeira etapa desta pesquisa, pôde-se ter início ao conhecimento do comportamento do ozônio diante dos parâmetros utilizados na flotação para o presente estudo. Para este fim, foi feito o monitoramento do efluente pós-tratado, determinando-se em laboratório alguns dos parâmetros considerados mais importantes relacionados ao pós-tratamento de esgotos domésticos por flotação e ozonização, tais como: DQO, fósforo total, cor aparente, turbidez, ferro e manganês. As coletas foram efetuadas com as seguintes velocidades de flotação: 6 cm/min, 12 cm/min, 16 cm/min, 20 cm/min e 25 cm/min.

Isso posto, uma segunda fase de ensaios foi elaborada e testada.

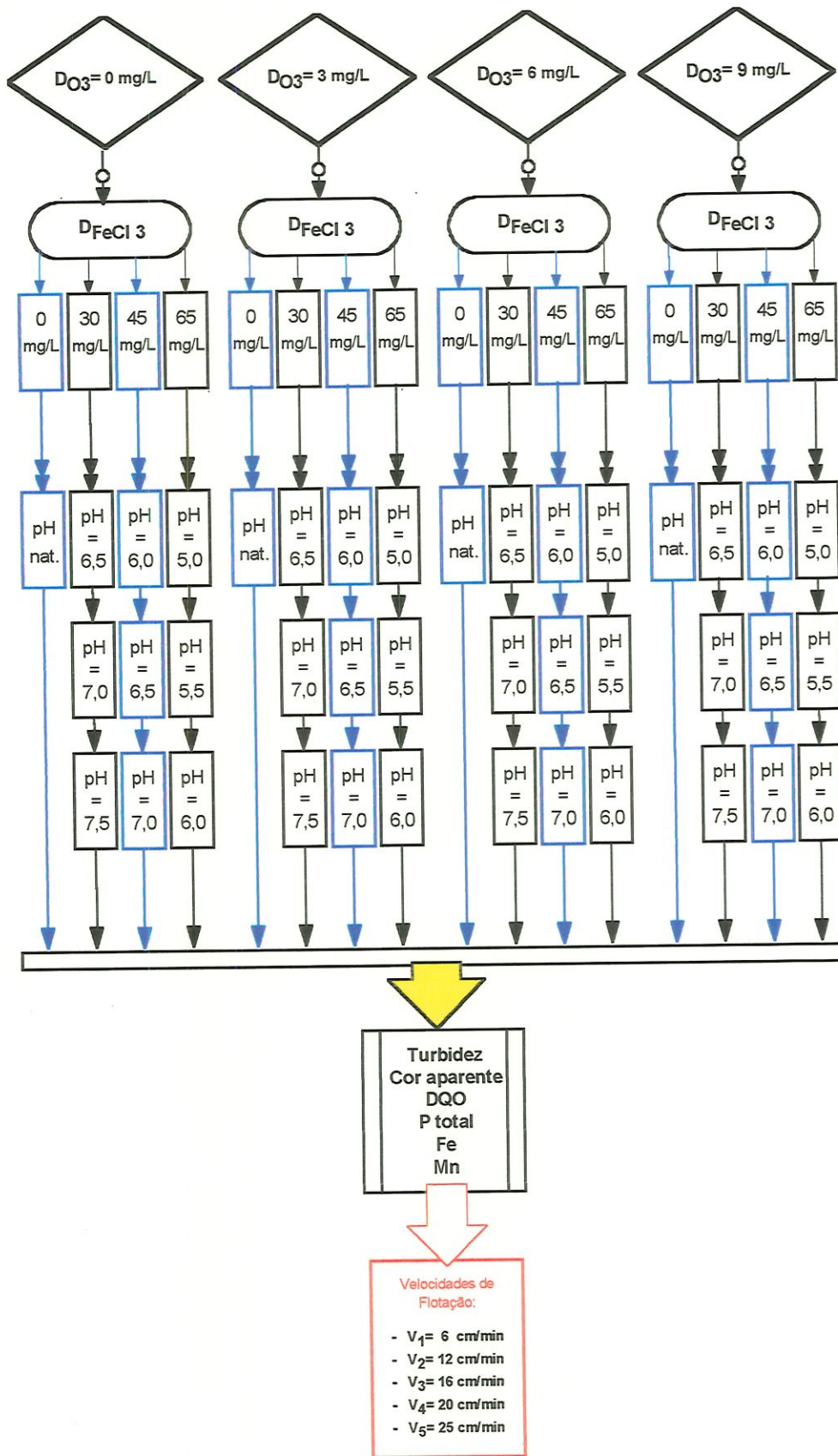


FIGURA 8 - PRIMEIRA ETAPA DE ENSAIOS



#### 4.5. Ensaios referentes à segunda etapa do presente estudo

Contando com um maior conhecimento do comportamento da água de estudo frente às variações das dosagens de ozônio, com correspondentes alterações nas dosagens de coagulante e pH, elaborou-se a segunda fase de ensaios do presente trabalho.

Desta vez, considerou-se extremamente importante para a condução do estudo, levar-se em conta os efeitos das alterações das características do afluente do reator anaeróbio. Duas razões foram levantadas para tal consideração. A primeira delas é que, em se analisando somente os resultados obtidos na fase anterior, ainda não era seguro concluir que, em se aumentando cada vez mais a dosagem do ozônio, aumentar-se-ia significativamente a remoção dos parâmetros considerados para a análise das amostras. A outra razão é a de que a época de realização desta etapa era de chuvas (final/início de ano), o que descaracterizava sobremaneira o afluente do reator, devido a ligações clandestinas de águas pluviais na rede coletora de esgotos.

Urgia, portanto, que se fixasse, para um mesmo dia de ensaios (efluente único do reator), uma única dosagem de coagulante ( $D_{\text{FeCl}_3}$ : 30, 45, 65 (mg/L)), varrendo-se, para tanto, as várias dosagens de ozônio ( $D_{\text{O}_3}$ : 0, 3, 6, 9 (mg/L)) e determinados valores de pH (pH: 5,0, 5,5, 6,5 e 7,5). Vale lembrar que se continuou trabalhando às terças-feiras, como antes.

A FIGURA 9 ilustra toda a seqüência de ensaios realizados nesta fase experimental.

Perfez-se o monitoramento do efluente pós-tratado, obtendo-se em laboratório os mesmos parâmetros da primeira etapa, excluindo-se as determinações de ferro e manganês e acrescentando-se a alcalinidade. Às amostras atribuíam-se às velocidades de flotação de 10 cm/min (apenas para alcalinidade), 12 cm/min, 18,5 cm/min e 25 cm/min.

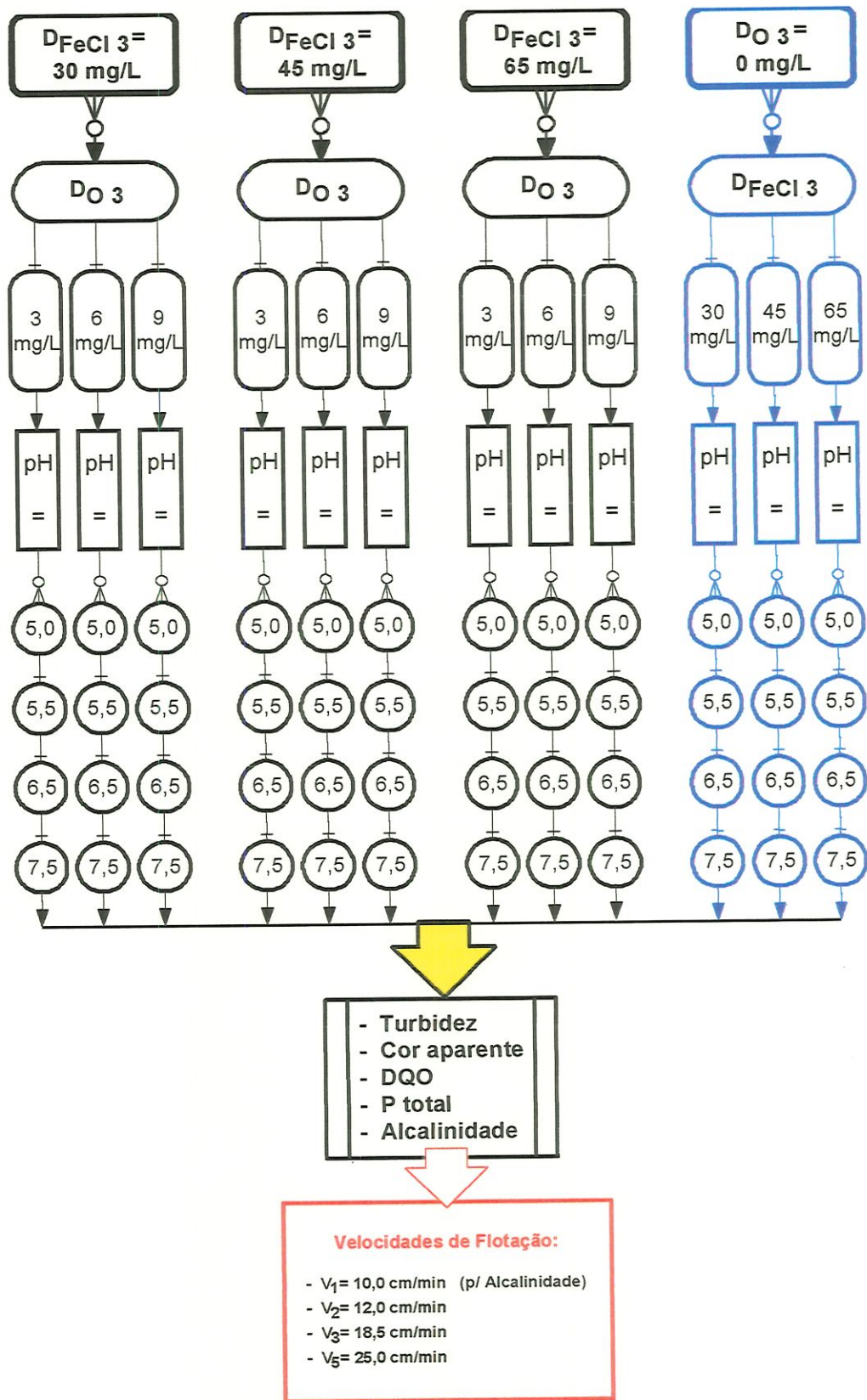


FIGURA 9 - SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS



#### 4.6. Ensaios referentes à terceira etapa do presente estudo

Alicerçando-se nos resultados oriundos do estágio anterior, pôde-se suscitar a terceira etapa de estudos. Eram já distinguidos os valores de pH, bem como das dosagens de coagulante e de oxidante que melhor se ajustavam à situação experimental do trabalho em questão.

Desde modo, estabeleceu-se que durante a terceira fase de ensaios estudar-se-iam dois valores de pH: um deles, correspondendo ao ótimo (pH: 5,5); o outro, referindo-se ao pH natural da água de estudo, possibilitando comparações e comentários de ordem prática. Para cada um desses valores de pH, seriam investigadas três dosagens de cloreto férrico ( $D_{\text{FeCl}_3}$ : 0, 45, 65 (mg/L)) para cada uma, duas dosagens de ozônio ( $D_{\text{O}_3}$ : 0, 6 (mg/L)).

Esta etapa foi efetuada durante um único dia (terça-feira), com coleta às 9 horas da manhã.

A FIGURA 10 elucida esta terceira fase de ensaios.

As determinações laboratoriais para as amostras foram as mesmas da etapa anterior, porém, relativas apenas à velocidade de flotação de 12 cm/min (e 10 cm/min para a alcalinidade) .

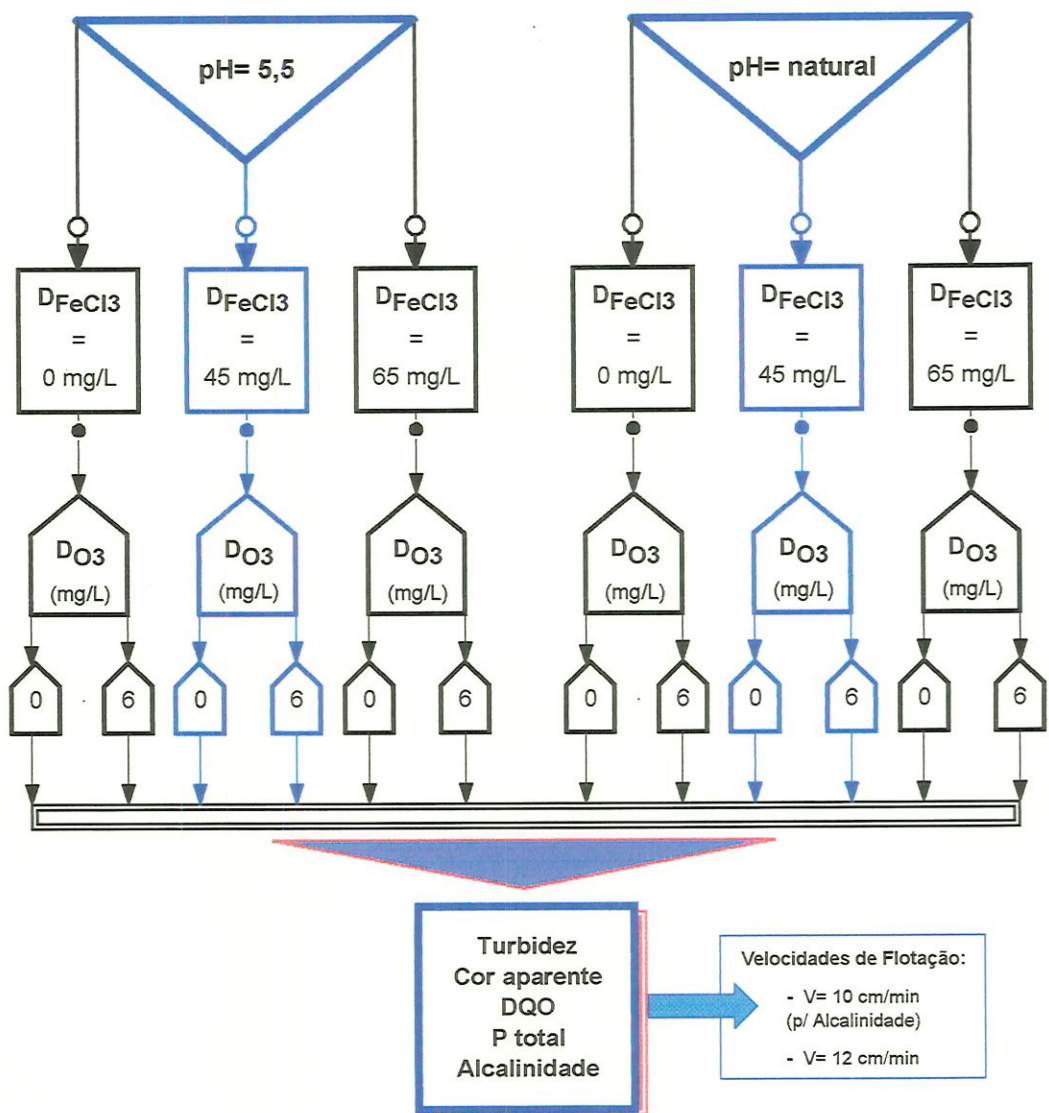


FIGURA 10 - TERCEIRA ETAPA DE ENSAIOS



#### 4.7. Ensaio referentes à quarta etapa do presente estudo

Concluída a terceira etapa de ensaios do presente estudo e, observando-se minuciosamente os resultados nela alcançados, julgou-se já haver dados suficientes para se aviar várias associações.

Isso posto, estabeleceu-se que a quarta fase experimental nada mais redundaria que na repetição dos melhores ensaios realizados na etapa anterior. A diferença era de que, além de ser eliminada a dosagem nula de coagulante, desta vez, perfazer-se-ia uma análise mais apurada das amostras (para velocidade de flotação de 12 cm/min): turbidez, cor aparente, DQO, DQO filtrada, fosfato total, DBO e nitrogênio total. Para se obter a quantidade amostral necessária para tais análises, foi preciso repetir cada ensaio duas vezes.

A FIGURA 11 exhibe, de forma esquemática, os ensaios executados neste quarto e último estágio.

Vale destacar que os ensaios atinentes aos coliformes fecais e totais, foram realizados separadamente, num outro dia exclusivo, uma vez que se tratam de determinações laboratoriais extremamente minuciosas, que requerem muitos cuidados na manipulação amostral. Para tanto, preocupou-se em avaliar quatro tipos de amostras: somente ozonizadas (com diferentes tempos de aplicação), ozonizadas e flotadas, apenas flotadas e o efluente do reator anaeróbio (branco).

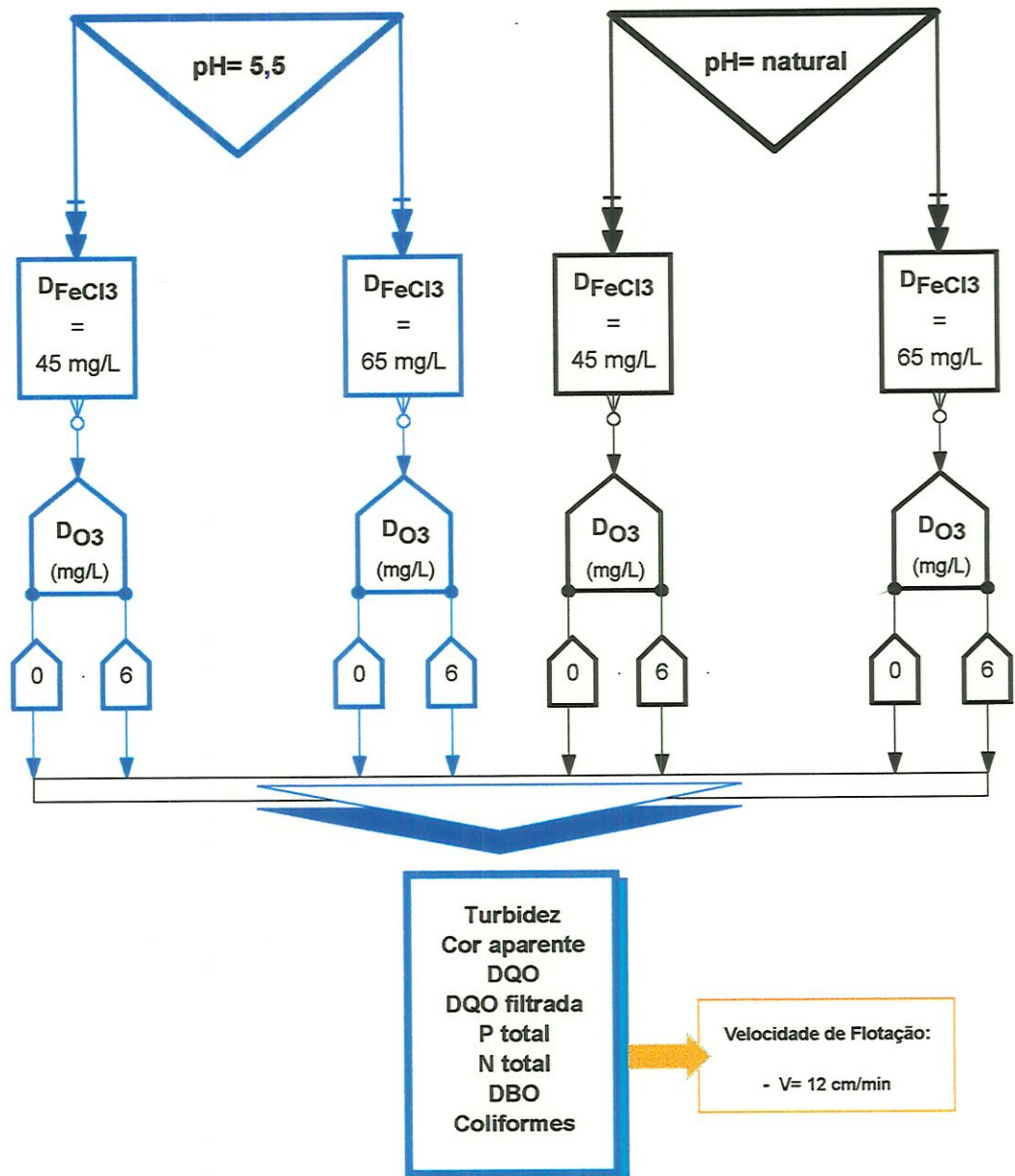


FIGURA 11 - QUARTA ETAPA DE ENSAIOS



✎ Observações importantes:

- Após a ozonização do efluente do reator anaeróbio com chicanas (volume ozonizado de 2 L), a amostra ozonizada era submetida à mistura rápida (volume de 1,8 L), onde era adicionado ácido clorídrico ou cal para a correção do pH ( $G= 300 \text{ s}^{-1}$ ,  $T= 1 \text{ min}$ ), quando programada, e, em seguida, era acrescentado o cloreto férrico ( $G= 550 \text{ s}^{-1}$ ,  $T= 1 \text{ min}$ ), nas dosagens preestabelecidas.
- Considerando-se as variações diárias das características do afluente e conseqüente efluente do reator anaeróbio com chicanas, fazia-se necessária a realização de alguns ensaios preliminares com a água de estudo, no que tangia ao pH. Portanto, a fim de se obter os valores de pH estipulados para as etapas de estudo, nos diferentes dias de ensaios, eram efetuados testes prévios de aplicação do coagulante (cloreto férrico) e das substâncias controladoras de pH (ácido clorídrico e cal) no efluente do reator anaeróbio, todas as vezes em que se dava início à série de ensaios programada para o dia. Dessa forma, as dosagens de cada produto químico a ser utilizado eram predefinidas, possibilitando, assim, suas aplicações na dosagem correta após a ozonização, evitando, dessa maneira, a perda de amostras ozonizadas, por não se atingir o valor de pH desejado, com a aplicação de dosagem errônea de cal ou ácido clorídrico.
- Durante os ensaios de ozonização, a fim de se verificar se a produção de ozônio pelo aparelho gerador continuava sendo a mesma que a determinada no início da fase experimental do presente estudo, antes de se ozonizar o efluente do reator anaeróbio na coluna de contato, testava-se, na coluna paralela (coluna de medição da produção), utilizando iodeto de potássio, se o tempo de ozonização, estipulado nos ensaios preliminares, continuava fornecendo a dosagem de ozônio a ser aplicada no atual ensaio. Se fossem constatadas alterações no valor da produção de ozônio, eram feitos os ajustes necessários para a sua correção, aumentando-se ou diminuindo-se o tempo de contato entre o gás e a

água de estudo. Vale notificar que quando se detectava alguma mudança no valor da produção do gerador de ozônio, esta era muito pequena. Essas verificações eram realizadas uma única vez, por dia de ensaios, no início destes.

- Cada amostra coletada após a flotação, continha um volume de 50 ml, suficiente para se determinar turbidez, cor aparente, DQO, P total e Fe. No que se refere à determinação de alcalinidade, por se tratar de uma análise laboratorial que exige 50 ml de volume amostral, estipulou-se que seria coletada, com exclusividade, uma amostra única para esta determinação, relacionada à velocidade de flotação de 10 cm/min.
- Todas as análises e exames laboratoriais (turbidez, cor aparente, DQO, DBO, P total, NTK, alcalinidade, Fe, coliformes) efetuados no presente trabalho seguem metodologia descrita no "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (19<sup>th</sup> edition)".



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Considerações iniciais

Conforme exposto no Capítulo 4, o estudo abrangeu a investigação do desempenho da pré-ozonização (antecedendo a mistura rápida) sobre a flotação, frente aos diversos valores de pH e respectivas dosagens de alcalinizante, acidulante, coagulante e oxidante. Utilizou-se como água de estudo o efluente de um reator anaeróbio com chicanas tratando esgoto doméstico.

É sabido que todos os ensaios foram efetuados empregando-se equipamentos em escala de laboratório com alimentação por batelada (*tipo batch*). Deve-se ressaltar, portanto, que todos os resultados alcançados no presente estudo foram analisados levando-se em conta as típicas restrições inerentes a esse tipo de ensaio ( batelada).

Os ensaios preliminares à pré-ozonização, responsáveis pelas determinações da produção do ozônio, do tempo de aplicação do gás na câmara de contato e da aplicabilidade do método de medição do seu residual (fase gasosa e no meio líquido), estão dispostos na forma de tabelas, seguidas de comentários explicativos.

Recordando, na primeira etapa de ensaios, o que se fez foi fixar quatro dosagens de ozônio ( $D_{O_3} = 0, 3, 6, 9$  (mg/L)), variando-se, para cada uma, quatro dosagens do coagulante cloreto férrico ( $D_{FeCl_3} = 0, 30, 45, 65$  (mg/L)), testando-se, para todas elas, vários valores de pH (pH= 5,0 a 7,5). Os resultados alcançados com a realização dos ensaios desta primeira fase apresentam-se na forma de quadros e figuras contendo curvas de flotação. A fim de se simplificar a visualização dos dados

resultantes das determinações laboratoriais, escolheu-se, para apresentação e discussão, apenas os valores correspondentes à velocidade de flotação de 12 cm/min, que é a mais significativa em termos de projeto de unidades de flotação por ar dissolvido. Vale ressaltar que os resultados completos desta etapa encontram-se no ANEXO 1.

A segunda fase envolveu ensaios em que foram fixadas as quatro dosagens do coagulante ( $D_{\text{FeCl}_3}$  = 0, 30, 45, 65 (mg/L)) e, para todas elas, foram investigadas as quatro dosagens de ozônio ( $D_{\text{O}_3}$  = 0, 3, 6, 9 (mg/L)), varrendo-se quatro valores de pH cada uma (pH = 5,0, 5,5, 6,5, 7,5). Como já mencionado, desta vez, os valores de pH utilizados basearam-se em análises conclusivas da etapa anterior. Os resultados logrados neste estágio experimental expressam-se na forma de quadros e gráficos contendo curvas de flotação. Os dados completos desta etapa estão contidos no ANEXO 2.

Isso posto, a terceira fase de estudos abrangeu um minucioso exame dos valores resultantes de cada variável determinada em laboratório a partir das amostras obtidas dos ensaios anteriores. Escolheu-se o pH e a dosagem de ozônio que proporcionavam as melhores remoções de todos os parâmetros envolvidos. Assim, fixando-se o valor do pH selecionado (pH = 5,5), variou-se três dosagens de coagulante ( $D_{\text{FeCl}_3}$  = 0, 45, 65 (mg/L)) e, para cada uma delas, testou-se duas dosagens de oxidante: a ótima ( $D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L) e a nula. O mesmo procedimento se repetiu para o pH natural da água. As determinações laboratoriais continuaram as mesmas da situação experimental anterior, mas referentes apenas à velocidade de flotação de 12 cm/min. Os resultados encontram-se sob a forma de quadros e gráficos comparativos.

A quarta e última etapa adveio da repetição dos melhores ensaios antes executados, diferindo na eliminação da dosagem nula de coagulante e realizando-se, desta vez, uma análise mais refinada das amostras. Os dados finais são exibidos sob a condição de quadros e gráficos.

Os resultados dos ensaios referentes aos exames de coliformes encontram-se na forma de um quadro.



## 5.2. Ensaios preliminares à pré-ozonização

### 5.2.1. Determinação do ozônio na fase gasosa

#### 5.2.1.1. Determinação da produção do aparelho gerador de ozônio

Seguindo o procedimento descrito no Capítulo 4, realizou-se uma série de ensaios destinados à determinação da produção do aparelho gerador de ozônio. Para tanto, foi fixado um número de tempos de ozonização suficiente para se obter segura informação a respeito do valor desta produção, bem como da dosagem de ozônio aplicada na coluna de contato.

A TABELA 2 delata os resultados obtidos com esses ensaios preliminares.

**TABELA 2 – Resultados dos ensaios determinantes da produção do aparelho gerador de ozônio**

Tempo de ozonização	Produção parcial – P <sub>1</sub> (coluna de contato)	Dosagem parcial de ozônio <i>D</i> <sub>O<sub>3</sub></sub>	Produção parcial – P <sub>2</sub> ("off gas")	Dosagem parcial de ozônio <i>D</i> <sub>O<sub>3</sub>off</sub>	Produção total - P <sub>total</sub>
(min)	(g/h O <sub>3</sub> )	(mg/L)	(g/h O <sub>3</sub> )	(mg/L)	(g/h O <sub>3</sub> )
2	0,176	2,9	0	0	0,176
4	0,172	5,7	0	0	0,172
6	0,170	8,5	0	0	0,170
8	0,169	11,3	0	0	0,169
10	0,161	13,4	0	0	0,161
12	0,157	15,7	0	0	0,157
14	0,151	17,6	0	0	0,151
16	0,152	20,3	0	0	0,152
18	0,157	23,6	0	0	0,157
20	0,161	26,8	0	0	0,161
<b>P<sub>média</sub></b>					<b>0,163</b>

Pode-se notar, de acordo com os dados da TABELA 2, que havia uma certa conformidade entre os valores referentes à primeira parcela da produção (medida na coluna de produção),  $P_1$ . Este fato denota que o aparelho gerador de ozônio trabalhava em condições normais, com as devidas oscilações naturais desse tipo de aparelho (ozonizador residencial).

Observa-se ainda, que não houve a parcela referente ao excesso de ozônio liberado pela coluna de contato, para os tempos de aplicação experimentados.

Desta forma, foi possível instituir a produção média de ozônio do aparelho gerador:

$$P_{\text{média}} = 0,163 \text{ g/h} \cong 160 \text{ mg/h} \cong 2,67 \text{ mg/min}$$

Descoberta a produção, o próximo passo foi definir quais seriam os tempos de ozonização para a obtenção das dosagens de ozônio a serem testadas ao longo do presente trabalho.

Vale lembrar que, no que tange aos ensaios de batelada, salienta-se a importância que se deve dar à realidade, no sentido de efetuar os ensaios da maneira mais uniforme possível. Nesses termos, para a concretização desta fase do estudo, raciocinou-se da seguinte forma: certamente que para uma dosagem menor de ozônio aplicada, o tempo, para tanto, seria menor que o referente à maior das dosagens. Pois bem: para que todos os ensaios permanecessem idênticos em relação ao tempo de intervalo entre a ozonização e a flotação, fixou-se certos tempos de espera para cada diferente dosagem de aplicação do oxidante. Tais tempos são mostrados na TABELA 3.

**TABELA 3 – Tempos de ozonização e espera referentes às dosagens de ozônio aplicadas**

$D_{O_3}$ (mg/L)	Tempo de aplicação	Tempo de espera	Somatória dos tempos
3	2 min + 15 s	5 min + 40 s	7 min + 55 s
6	4 min + 30 s	3 min + 25 s	7 min + 55 s
9	6 min + 45 s	1 min + 10 s	7 min + 55 s



Como se pode atentar, a somatória dos tempos de aplicação do ozônio e de espera para se iniciar a determinação do seu residual na água de estudo e/ou no “off gas” é a mesma, tornando o trabalho experimental coerente.

### 5.2.2. Determinação do ozônio na fase líquida

#### 5.2.2.1. Determinação do residual de ozônio – método iodométrico

Conforme mencionado no Capítulo 4, para se proceder à análise do residual de ozônio presente na água de estudo, escolheu-se a utilização da maior dosagem de aplicação pretendida para os ensaios de pré-ozonização ( $D_{O_3} = 9$  mg/L). Se não houvesse um valor remanescente de ozônio para esta dosagem, não haveria para as menores ( $D_{O_3} = 3$  e  $6$  mg/L).

O que se verificou é mostrado na TABELA 4.

**TABELA 4 – Determinação do residual de ozônio para a maior dosagem aplicada**

Tempo de Aplicação ( $D_{O_3} = 9$ mg/L)	ml de $Na_2S_2O_3$ consumido na titulação da amostra	ml de $Na_2S_2O_3$ consumido na titulação do “OFF <sub>1</sub> ”	ml de $Na_2S_2O_3$ consumido na titulação do “OFF <sub>2</sub> ”	Residual de ozônio (mg/L)
6 min+45 s	0	0	0	0
6 min+45 s	0	0	0	0
6 min+45 s	0	0	0	0
6 min+45 s	0	0	0	0

Atentando-se para os valores contidos na TABELA 4, pode-se concluir que não há residual de ozônio no efluente ozonizado com a dosagem máxima pré-fixada ( $D_{O_3} = 9$  mg/L) o que, obviamente conduz à alegação de não existência de residual também para as dosagens inferiores.

Porém, era nítida ainda a necessidade de se verificar a adequação do método iodométrico para esta determinação. Assim, estabeleceu-se que seria testado, repetidas vezes, um tempo de aplicação de ozônio exageradamente maior (30 minutos) que o anterior, a fim de se aumentar a possibilidade de se encontrar um valor de residual para assegurar a confiabilidade do método empregado.

Os dados resultantes deste teste de fidedignidade encontram-se na TABELA 5.

**TABELA 5 – Determinação do residual de ozônio correspondente ao tempo de ozonização de 30 minutos**

Tempo de Aplicação ( $D_{O_3} \cong 40$ mg/L)	ml de $Na_2S_2O_3$ consumido na titulação da amostra	ml de $Na_2S_2O_3$ consumido na titulação do "OFF <sub>1</sub> "	ml de $Na_2S_2O_3$ consumido na titulação do "OFF <sub>2</sub> "	Residual de ozônio (mg/L)
30 min	0,15	24,95	0,25	0,18
30 min	0,15	24,95	0,25	0,18
30 min	0,13	24,95	0,23	0,16
30 min	0,15	24,90	0,25	0,18

De posse dos valores expostos acima, pode-se afirmar, de antemão, que há constância entre eles, salvo mínimas diferenças. Vale lembrar que após fixadas com o ácido sulfúrico (vide procedimento do método no Capítulo 4) as amostras foram submetidas a 20 minutos de centrifugação para se facilitar a visualização do ponto de virada durante as titulações. Essa medida em nada alteraria a determinação do residual de ozônio, uma vez que apenas as partículas em suspensão (maiores responsáveis pela cor aparente da água) é que seriam removidas.

Dessa maneira, foi conveniente confiar no método iodométrico para a determinação do residual de ozônio e iniciar, de uma vez por todas, os ensaios de pré-ozonização. Considerou-se que não haveria residual de ozônio presente na água de estudo submetida à aplicação das pretendidas



dosagens. Se houvesse, esse valor seria extremamente pequeno, muito próximo de zero e impossível de se determinar pelo método iodométrico. Além do que, desapareceria brevemente, uma vez que o ozônio é um gás instável e se decompõe muito rapidamente.

### 5.3. Resultados dos ensaios referentes à primeira etapa de estudo

A seguir, na FIGURA 12 são apresentados os resultados das determinações e análises físico-químicas que caracterizam as amostras pré-ozonizadas e flotadas segundo metodologia descrita no Capítulo 4, correspondente aos ensaios efetuados na primeira fase do presente estudo.

Conforme mencionado, foram escolhidos para apresentação e discussão apenas os valores referentes à velocidade de flotação de 12 cm/min que é a mais representativa de todas. Para maiores esclarecimentos sobre todos os dados obtidos, concernentes às demais velocidades de flotação, deve-se consultar o ANEXO 1.

Posterior à FIGURA 12, são apresentados gráficos relativos às curvas de flotação para cada dosagem de ozônio aplicada e respectiva dosagem de cloreto férrico.

Nessa etapa do trabalho, assim como nas demais, foram aplicadas, conforme demonstrado na TABELA 6, as seguintes condições de mistura rápida, floculação e flotação por ar dissolvido.

TABELA 6 – Condições operacionais para todas as etapas de estudo

	Gradiente de velocidade (s <sup>-1</sup> )	Tempo (min)	Recirculação (%)	Pressão de saturação (kPa)
Mistura rápida	550	1	-	-
Floculação	60	20	-	-
FAD	-	-	18	450 ± 10

Água	V	D <sub>O3</sub>	D <sub>FeCl3</sub>	D <sub>HCl1%</sub>	D <sub>CaI</sub>	pH	Turbidez		Cor Aparente		DQO		P total		Fe				
	cm/min	mg/L	mg/L	ml/L	mg/L		uT	% R	uPtCo	% R	mg/L	% R	mg/L	% R	mg/L	% R			
T i p o  A	12	0	0	0,0	0,0	6,7	69,5	19,2	525,8	27,0	167,2	30,2	18,0	12,6	0,39	11,0			
				0,0	0,0	6,4	53,8	37,4	478,5	33,5	155,5	35,0	14,3	30,6	5,19	-1080,0			
				0,0	50,0	6,7	39,1	54,5	396,0	45,0	155,5	35,0	9,4	54,4	2,46	-459,0			
			45	0,0	120,0	7,5	25,0	70,9	299,2	58,4	111,9	53,3	9,1	55,8	1,45	-230,0			
				0,0	0,0	6,2	32,9	61,7	350,9	51,3	129,4	45,9	10,6	48,5	3,77	-757,0			
				0,0	20,0	6,4	36,6	57,4	348,7	51,6	129,4	45,9	8,9	56,8	3,44	-682,0			
			65	0,0	100,0	6,8	31,2	63,7	298,1	58,6	103,2	56,9	6,9	66,5	1,34	-205,0			
				0,0	0,0	6,0	29,2	66,0	293,7	59,2	100,2	58,1	5,8	71,8	5,96	-1255,0			
				11,1	0,0	5,6	21,2	75,3	136,4	81,1	94,4	60,6	6,6	68,0	4,21	-857,0			
						22,2	0,0	4,8	3,9	95,5	52,8	92,7	68,2	71,5	2,6	87,4	3,03	-589,0	
			T i p o  B	12	3	0	0,0	0,0	7,0	84,3	29,2	387,8	49,1	138,2	53,0	21,5	1,8	0,15	91,0
							0,0	0,0	6,7	46,3	61,1	327,3	57,1	114,8	61,0	12,9	41,1	2,20	-35,0
0,0	40,0	7,0					32,5	72,7	275,0	63,9	94,4	67,9	12,3	43,8	0,89	45,0			
45	0,0	110,0				7,7	19,3	83,8	181,5	76,2	62,4	78,8	11,8	46,1	0,88	46,0			
	0,0	0,0				6,5	36,5	69,3	349,3	54,2	91,5	68,9	12,8	41,6	2,37	-45,0			
	0,0	10,0				6,1	33,1	72,2	305,3	60,0	109,0	62,9	9,8	55,3	2,88	-77,0			
65	0,0	90,0				7,2	21,8	81,7	233,8	69,3	76,9	73,8	8,1	63,0	0,83	49,0			
	0,0	0,0				6,3	28,7	75,9	236,5	69,0	103,2	64,9	5,6	74,4	2,39	-47,0			
	8,3	0,0				5,7	25,0	79,0	187,0	75,5	91,5	68,9	4,5	79,5	2,23	-37,0			
						16,7	0,0	5,2	3,9	96,7	77,0	89,9	65,3	77,8	3,0	86,3	1,10	33,0	
T i p o  C	12	6				0	0,0	0,0	7,3	95,2	23,8	486,8	25,1	187,7	31,0	21,6	-4,7	0,34	24,0
							0,0	0,0	6,8	48,7	61,0	315,7	51,4	123,5	54,6	12,7	38,6	1,63	-262,0
			0,0	10,0	7,0		40,7	67,4	283,3	56,4	126,4	53,5	12,0	41,8	1,45	-222,0			
			45	0,0	30,0	7,3	34,2	72,6	242,0	62,8	114,8	57,8	12,5	39,1	1,28	-184,0			
				0,0	0,0	6,6	27,7	77,8	211,8	67,4	106,0	61,0	8,6	58,3	2,01	-347,0			
				5,6	0,0	6,2	30,1	75,9	222,8	65,7	114,8	57,8	8,9	56,7	2,97	-560,0			
			65	0,0	20,0	6,8	32,2	74,2	236,5	63,6	120,7	55,6	7,4	64,2	1,36	-202,0			
				0,0	0,0	6,2	23,8	81,0	178,8	72,5	103,2	62,1	5,1	75,4	2,09	-364,0			
				16,7	0,0	5,4	4,7	96,2	38,5	94,1	65,3	76,0	2,6	87,2	1,09	-142,0			
						25,0	0,0	4,5	21,8	82,6	140,3	78,4	79,9	70,6	8,1	60,5	8,80	-1856,0	
			T i p o  D	12	9	0	0,0	0,0	7,3	49,3	38,4	412,5	45,9	126,5	49,6	13,1	13,9	0,31	21,0
							0,0	0,0	6,7	24,8	69,0	305,3	60,0	111,9	55,4	8,0	47,2	5,45	-1297,0
0,0	20,0	7,0					15,4	80,8	269,5	64,7	62,4	75,2	5,2	66,0	1,65	-323,0			
45	0,0	50,0				7,6	13,2	83,5	209,0	72,6	88,6	64,7	5,2	66,0	1,02	-162,0			
	0,0	0,0				6,4	12,8	84,0	214,5	71,9	62,4	75,2	4,3	71,8	0,55	-41,0			
	2,8	0,0				6,1	13,3	83,4	236,5	69,0	71,1	71,7	5,0	67,4	5,57	-1328,0			
65	0,0	40,0				7,1	10,6	86,8	203,5	73,3	68,2	72,8	2,8	81,9	0,97	-149,0			
	0,0	0,0				6,1	6,3	92,1	126,5	83,4	56,5	77,5	2,1	86,3	2,52	-546,0			
	5,6	0,0				5,7	2,4	97,0	60,5	92,1	42,0	83,3	0,4	97,1	1,05	-169,0			
						13,9	0,0	4,7	1,2	98,5	30,3	96,0	36,2	85,6	0,0	100,0	0,77	-97,0	

FIGURA 12 – Resultados referentes à primeira etapa de ensaios para velocidade de flotação = 12 cm/min

⇒ Água:

Tipo A: pH= 6,7; Turb.= 80,0-86,0 uT; Cor= 710,0-720,0 uPtCo; DQO= 239,4 mg/L; Ptot= 20,6 mg/L; Fe= 0,44 mg/L; Mn= 0 mg/L

Tipo B: pH= 7,1; Turb.= 98,0-119,0 uT; Cor= 722,5-762,5 uPtCo; DQO= 294 mg/L; Ptot= 21,9 mg/L; Fe= 1,62 mg/L; Mn= 0,01 mg/L

Tipo C: pH= 6,5; Turb.= 102,0-125,0 uT; Cor= 650,0-654,0 uPtCo; DQO= 272,0 mg/L; Ptot= 20,6 mg/L; Fe= 0,45 mg/L; Mn= 0 mg/L

Tipo D: pH= 6,5; Turb.= 76,8-80,0 uT; Cor= 745,0-762,5 uPtCo; DQO= 251,0 mg/L; Ptot= 15,2 mg/L; Fe= 0,39 mg/L; Mn= 0 mg/L



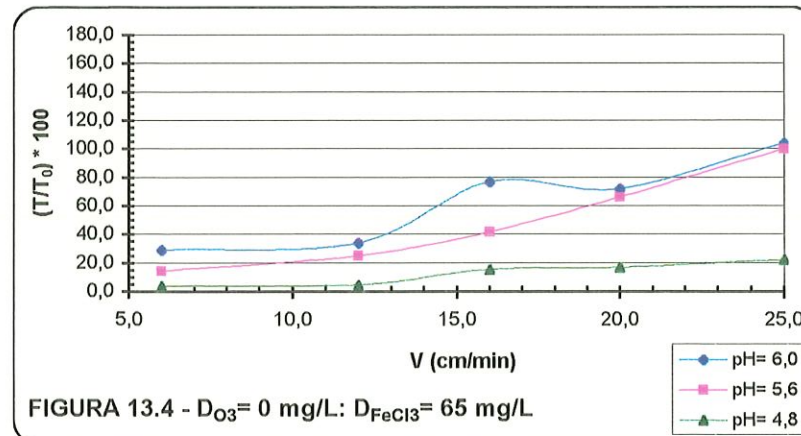
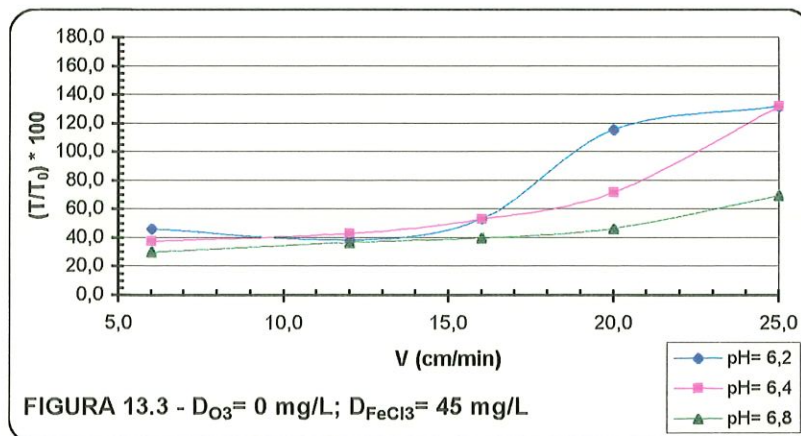
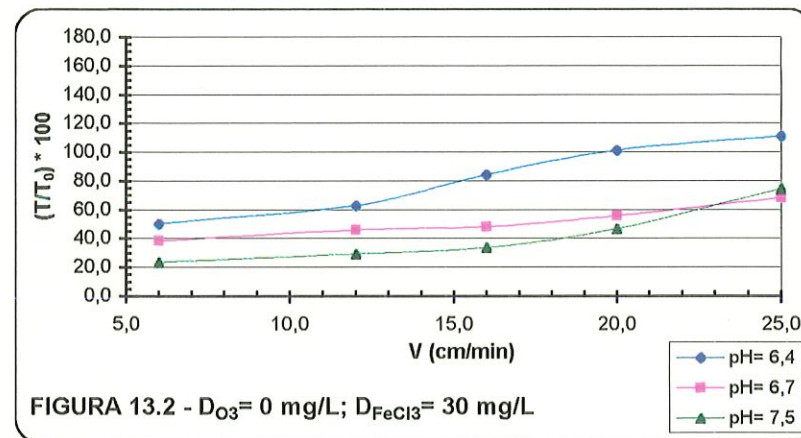
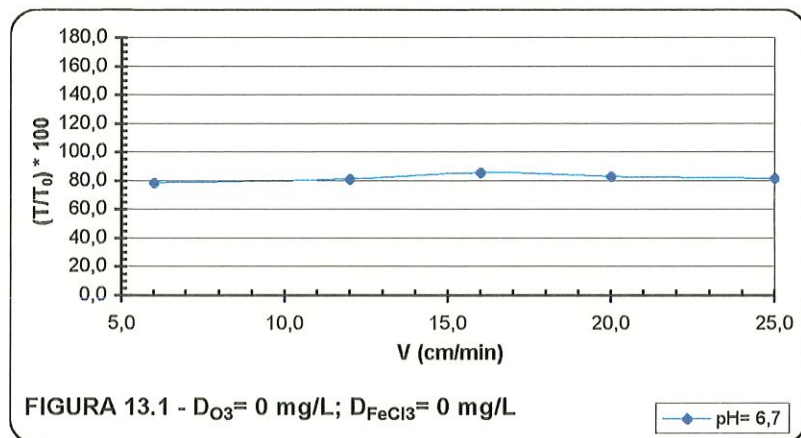


FIGURA 13 - Curvas de flotação para turbidez referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 0 mg/L  
(Água Tipo A:  $T_0 = 80,0 - 86,0 \text{ uT}$ )

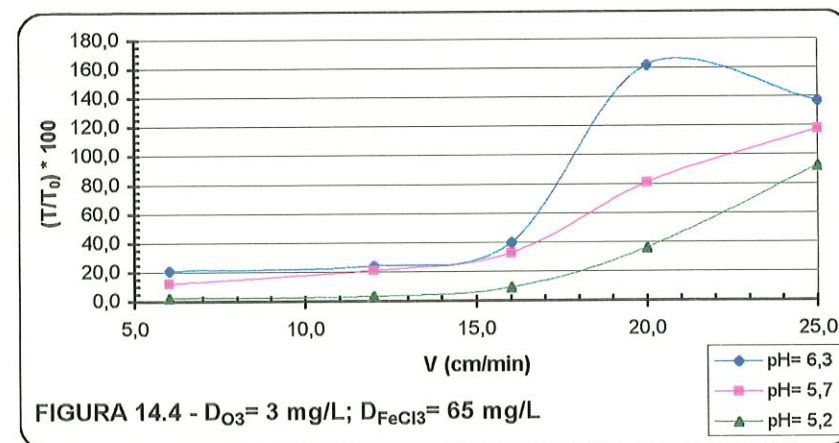
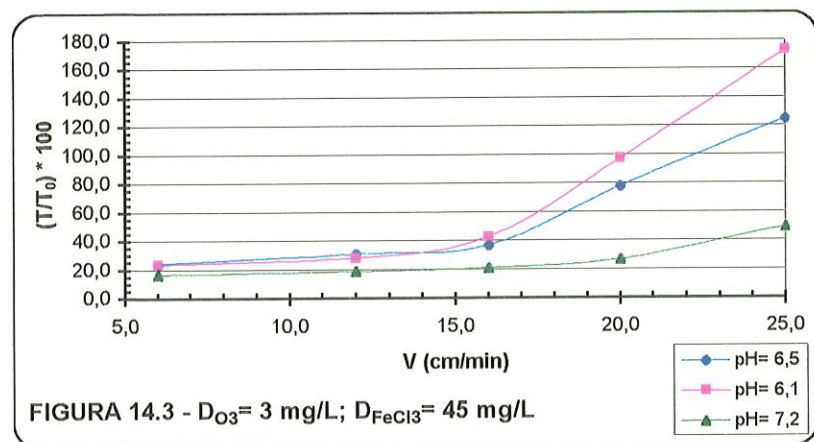
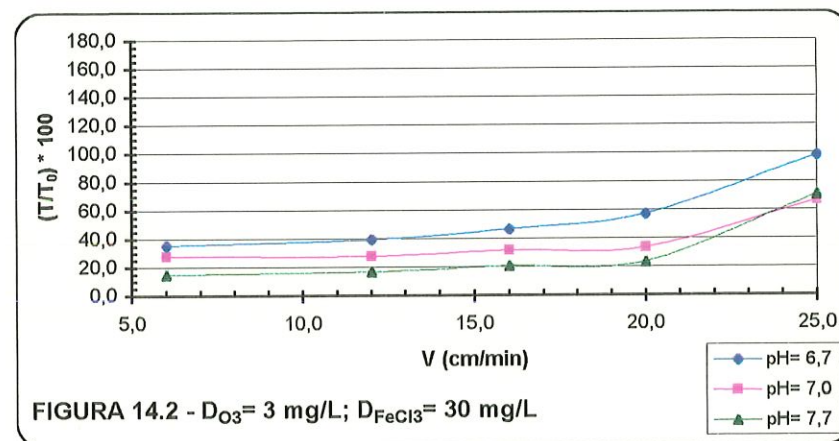
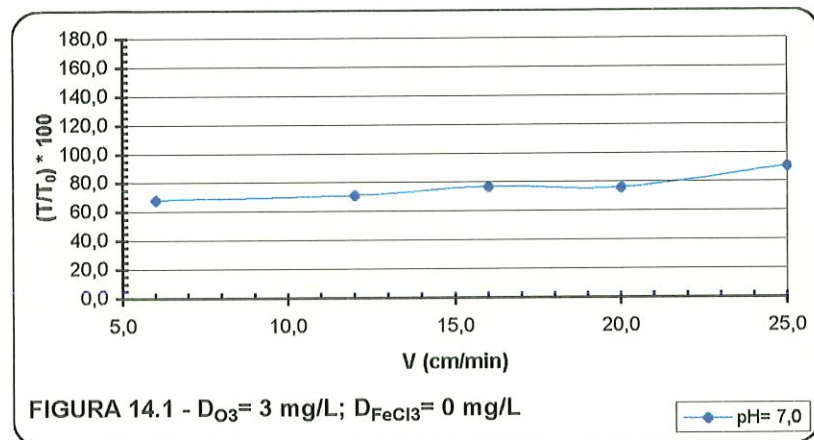


FIGURA 14 - Curvas de flotação para turbidez referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 3 mg/L  
(Água Tipo B:  $T_0 = 98,0 - 119,0 \text{ uT}$ )



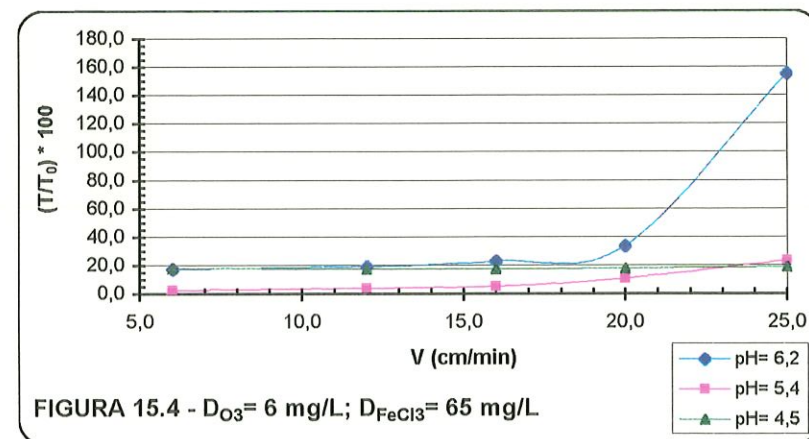
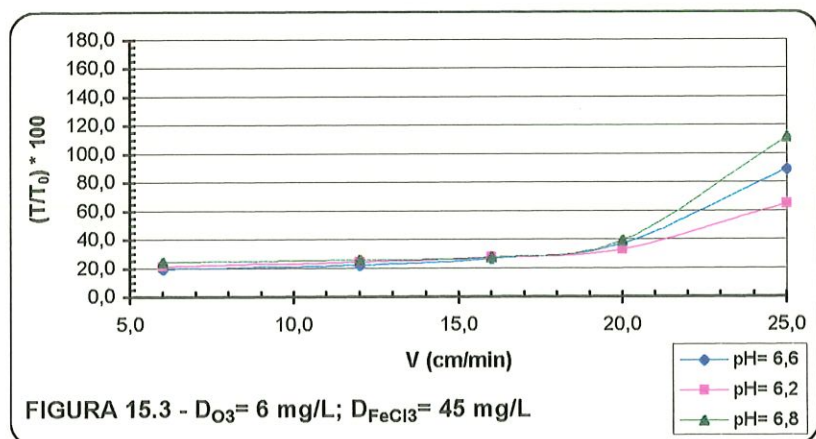
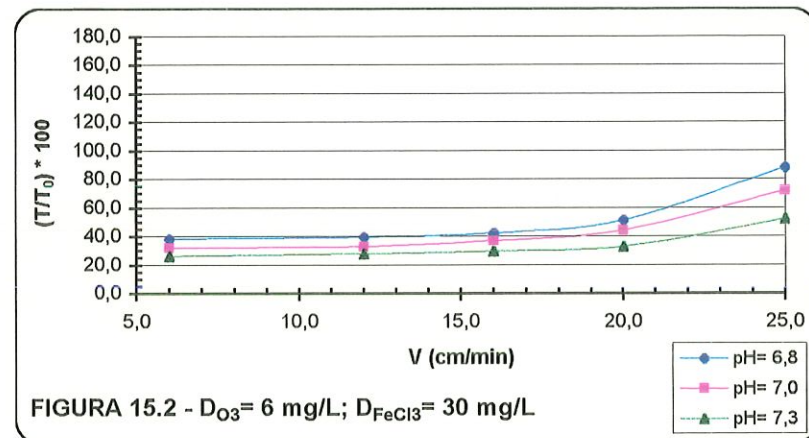
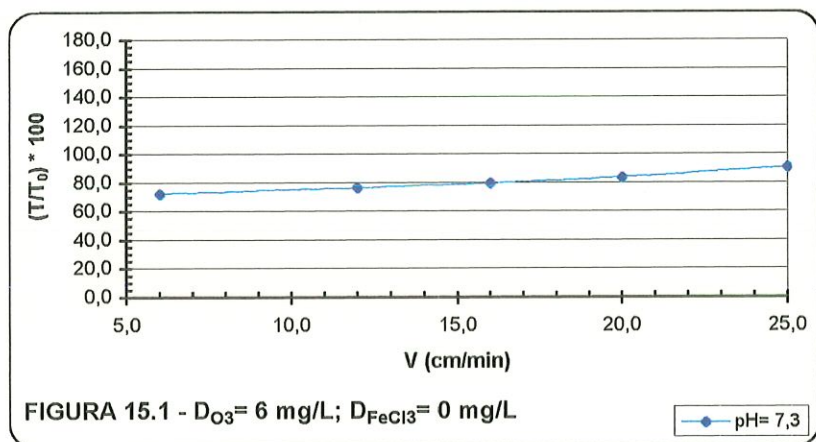


FIGURA 15 - Curvas de flotação para turbidez referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 6 mg/L  
(Água Tipo C:  $T_0 = 102,0 - 125,0 \text{ uT}$ )

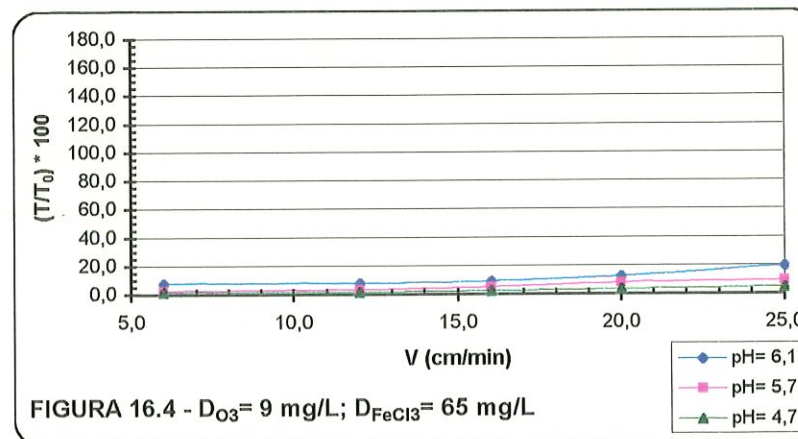
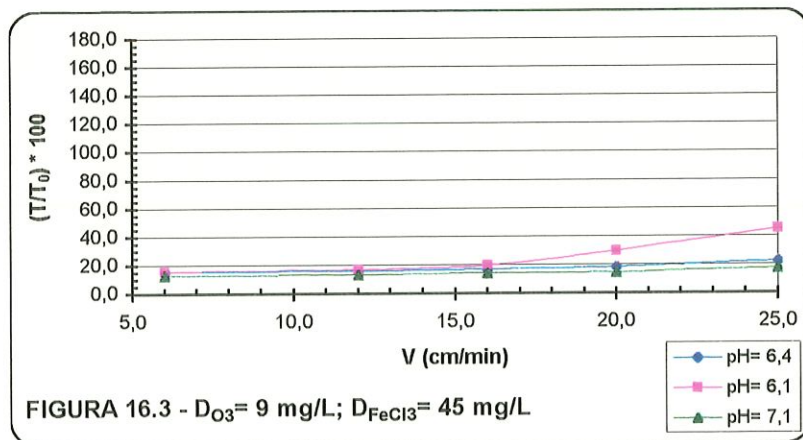
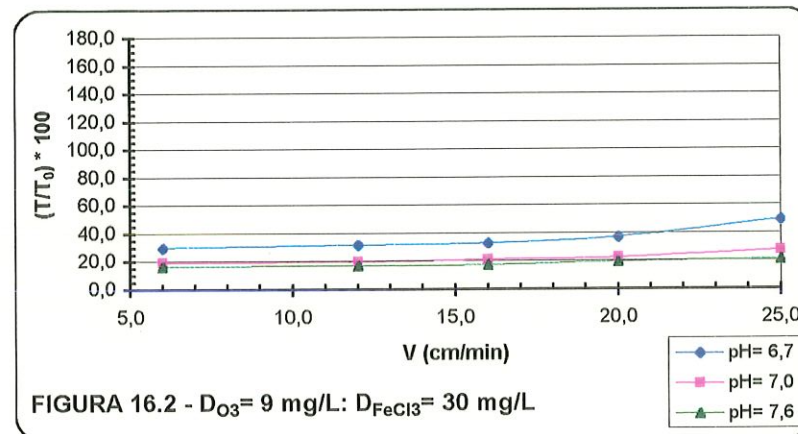
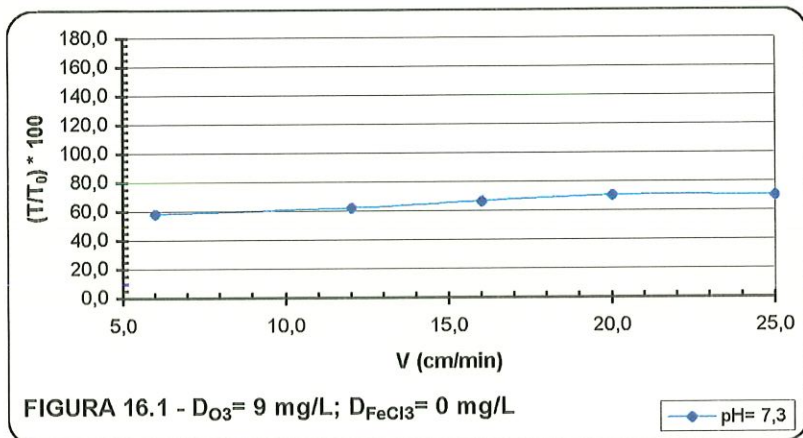


FIGURA 16 - Curvas de flotação para turbidez referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 9 mg/L  
(Água Tipo D:  $T_0 = 76,8 - 80,0 \text{ uT}$ )



Observando-se as curvas de flotação para turbidez, apresentadas na FIGURA 13 ( $D_{O_3} = 0$ ), verifica-se que, para  $D_{FeCl_3} = 0$  (FIGURA 13.1), em toda a faixa de velocidade de flotação investigada, a eficiência de remoção de turbidez permaneceu praticamente constante ( $R \cong 20\%$ ). Por sua vez, quando  $D_{FeCl_3} = 30$  mg/L (FIGURA 13.2), observa-se que o valor de pH de 7,5 (maior valor estudado) forneceu os melhores resultados de remoção de turbidez ( $R \cong 70\%$  para  $V = 12$  cm/min). Nota-se que, quando  $D_{FeCl_3} = 45$  mg/L (FIGURA 13.3), a eficiência de remoção de turbidez apresenta-se, para todas as velocidades de flotação, melhor sob pH= 6,8, sendo que, para  $V = 12$  cm/min, a diferença na eficiência de remoção de turbidez para toda a faixa de pH estudada é praticamente nula ( $R \cong 60\%$ ). É nítido verificar que, quando  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L (FIGURA 13.4), o valor de pH de 4,8 é o que fornece as melhores remoções de turbidez, para todas as velocidades estudadas ( $R \cong 95\%$  para  $V = 12$  cm/min). Dessa forma, de acordo com a FIGURA 13, pode-se constatar que as condições ótimas de flotação, para o afluente em questão, sem a aplicação do ozônio, são aquelas em que se trabalham com valor de pH por volta de 5,0 e dosagem de coagulante de 65 mg/L.

Em se observando as curvas de flotação para turbidez, expostas na FIGURA 14 ( $D_{O_3} = 3$  mg/L), nota-se que, para  $D_{FeCl_3} = 0$  (FIGURA 14.1), para toda a faixa de velocidade de flotação analisada, a eficiência de remoção de turbidez variou entre 10 a 30 %. Quando  $D_{FeCl_3} = 30$  mg/L (FIGURA 14.2), observa-se que o valor de pH de 7,7 proporcionou os melhores resultados de remoção de turbidez, com poucas variações entre  $V = 6$  cm/min a  $V = 20$  cm/min ( $R$  entre 75 % e 85 %), sendo que, para  $V = 25$  cm/min a remoção de turbidez é quase a mesma para este valor de pH (7,7) e para o valor de pH de 7,0 ( $R \cong 30\%$ ). Verifica-se que, quando  $D_{FeCl_3} = 45$  mg/L (FIGURA 14.3), a eficiência de remoção de turbidez apresenta-se, para todas as velocidades de flotação, melhor com pH= 7,2, ao passo que, para  $V = 12$  cm/min, a diferença na eficiência de remoção de turbidez para a faixa de pH entre 6,0 e 6,5 é praticamente nula ( $R \cong 70\%$ ), com ligeira melhora para pH de 7,2 ( $R \cong 80\%$ ). Fica claro observar que, quando  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L

(FIGURA 14.4), o valor de pH de 5,2 é o que fornece as melhores remoções de turbidez, para todas as velocidades estudadas ( $R \cong 97\%$  para  $V = 12$  cm/min). Vale comentar que para a curva referente ao valor de pH de 6,3, com  $V = 20$  cm/min, ocorre uma anormalidade, pois o valor da eficiência de remoção de turbidez neste ponto apresenta-se maior que o relativo a  $V = 25$  cm/min, fato que na realidade, não deveria acontecer. Isso se deve, certamente, a imperfeições ocorridas durante o experimento ou no momento de coleta da amostra. (vide FIGURA 14.4).

Investigando-se as curvas de flotação mostradas na FIGURA 15 ( $D_{O_3} = 6$  mg/L), verifica-se que, para  $D_{FeCl_3} = 0$  (FIGURA 15.1), em toda a faixa de velocidade de flotação analisada, a eficiência de remoção de turbidez alterou-se entre 10 a 30 %, como também observado na FIGURA 14.1. Quando  $D_{FeCl_3} = 30$  mg/L (FIGURA 15.2), observa-se que o valor de pH de 7,3 propiciou os melhores resultados de remoção de turbidez, com poucas variações entre  $V = 6$  cm/min a  $V = 20$  cm/min ( $R$  entre 70 % e 75 %), fato também constatado para as demais curvas, referentes aos valores de pH de 7,0 e 6,8. Quando  $D_{FeCl_3} = 45$  mg/L (FIGURA 15.3), nota-se que a eficiência de remoção de turbidez mostra-se praticamente a mesma, para toda a faixa de pH estudada, relativa às velocidades de flotação entre 6 e 20 cm/min. De acordo com a FIGURA 15.4, observa-se que, desta vez, quando  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L, o valor de pH de 5,4 é o que fornece as melhores remoções de turbidez, para todas as velocidades estudadas ( $R \cong 93\%$  para  $V = 12$  cm/min). Para esta situação, verifica-se que, até um valor de velocidade de flotação por volta de 20 cm/min, não há diferenças significativas entre as curvas referentes aos valores de pH de 6,2 e 4,5. Adicionalmente, pode-se notar que, para  $V = 25$  cm/min, as eficiências de remoção de turbidez são aproximadamente iguais, para valores de pH de 4,5 e 5,4.

As curvas de flotação para turbidez apresentadas na FIGURA 16 ( $D_{O_3} = 9$  mg/L) mostram que, para  $D_{FeCl_3} = 0$  (FIGURA 16.1), para toda a faixa de velocidade de flotação analisada, a eficiência de remoção de turbidez variou entre 30 a 45 %. Para  $D_{FeCl_3} = 30$  mg/L (FIGURA 16.2), nota-se que os valores de pH de 7,0 e 7,6 forneceram os melhores resultados de remoção



de turbidez, com poucas variações entre  $V = 6$  cm/min a  $V = 25$  cm/min ( $R$  entre 70 % e 85 %). Verifica-se que, quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 45$  mg/L (FIGURA 16.3), a eficiência de remoção de turbidez exhibe-se, para todas as velocidades de flotação, a mesma ( $R \cong 85$  %), para todos os valores de pH, até a velocidade de flotação igual a 16 cm/min, quando a curva referente ao pH de 6,1 começa a sofrer leve alteração, diminuindo o valor da eficiência de remoção de turbidez para, aproximadamente, 65 %. Na FIGURA 16.4, pode-se observar que, quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 65$  mg/L, a diferença entre os valores das remoções de turbidez é ainda menor que no caso anterior ( $R$  entre 94 % e 98 %), mostrado na FIGURA 16.3, para todas as velocidades de flotação estudadas. O que se observa é uma leve alteração da curva de pH igual a 6,1, para a velocidade de flotação de 25 cm/min ( $R \cong 80$  %).

Dessa forma, com relação à primeira etapa de ensaios, pode-se verificar, à primeira instância, que, para um mesmo tipo de água estudado, as melhores situações de remoção de turbidez são aquelas em que as dosagens de ozônio e de coagulante são as máximas aplicadas ( $D_{\text{O}_3} = 9$  mg/L e  $D_{\text{FeCl}_3} = 65$  mg/L), especialmente para velocidade de flotação igual a 12 cm/min (vide FIGURA 16.4).

A seguir, são expostas as curvas de flotação relativas à cor aparente (FIGURA 17 a FIGURA 20).

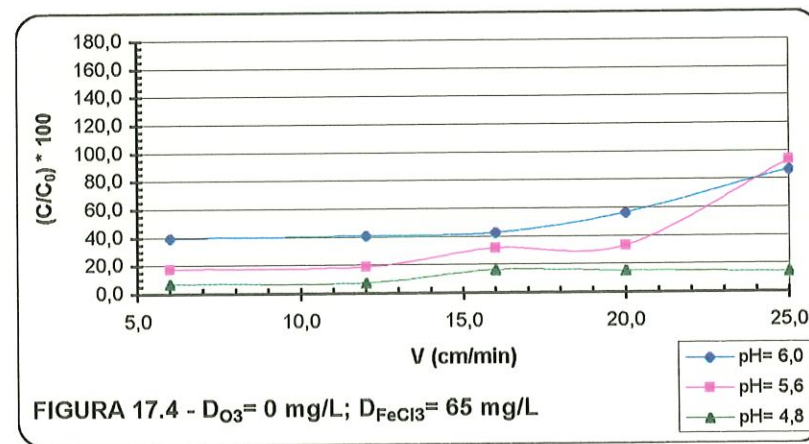
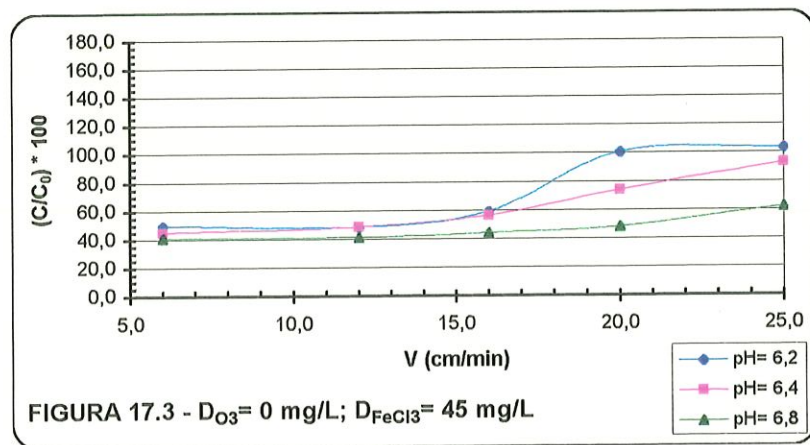
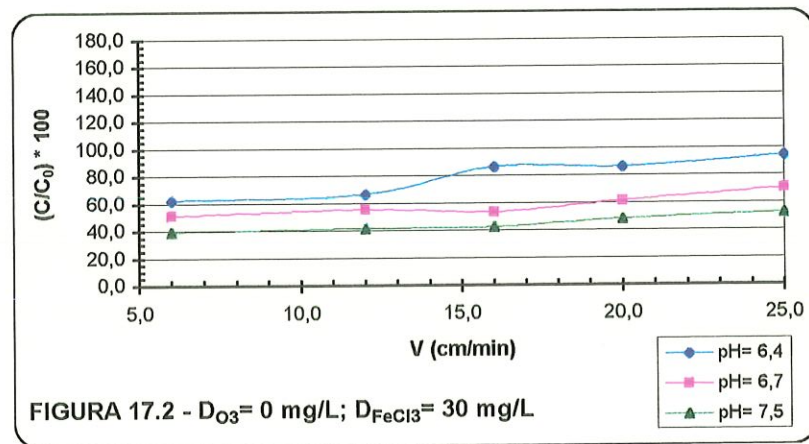
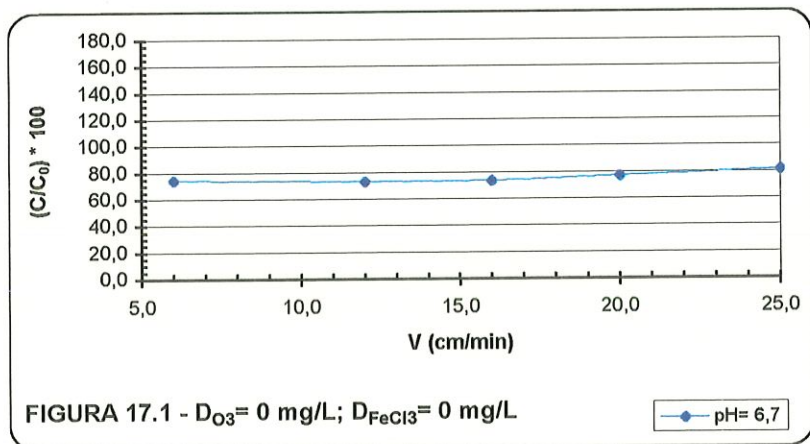
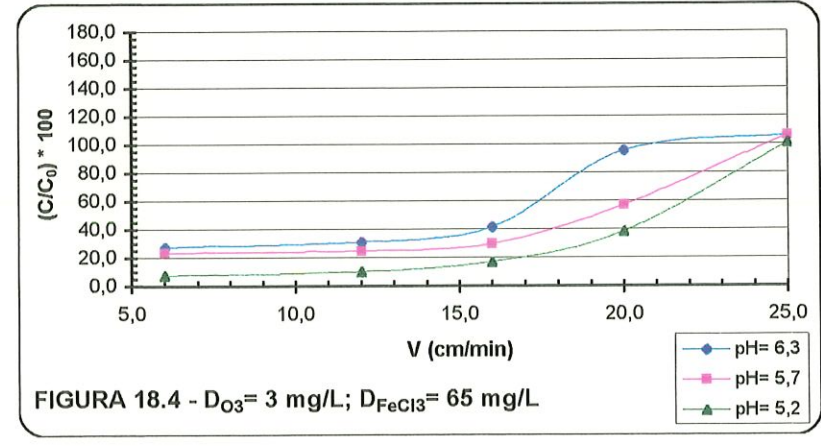
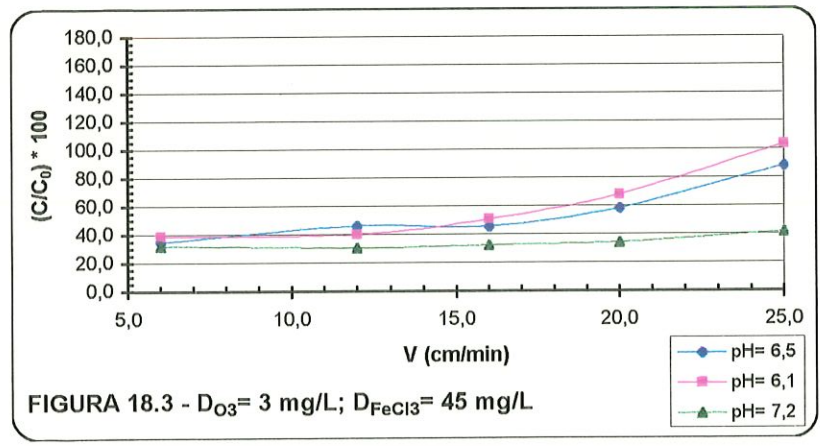
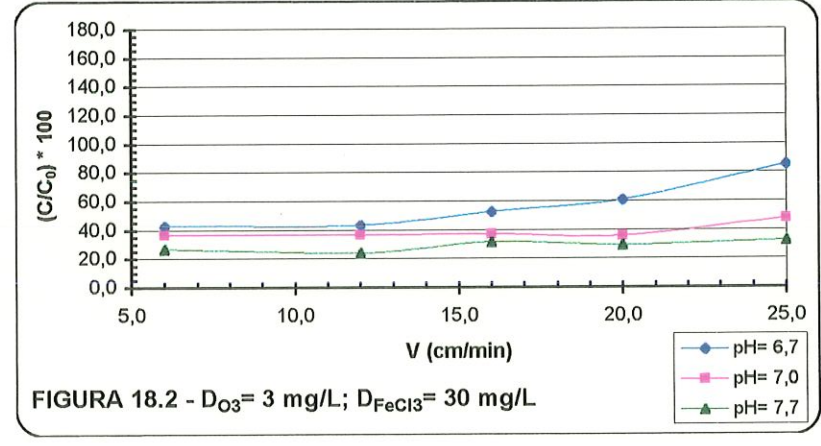
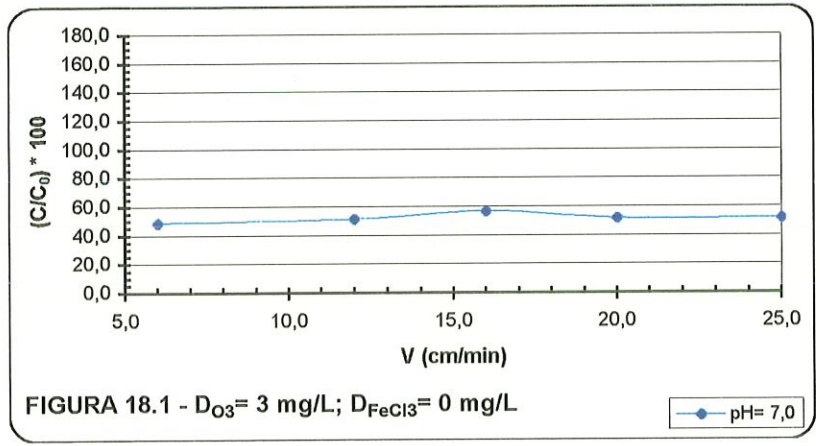


FIGURA 17 - Curvas de flotação para cor aparente referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 0 mg/L (Água Tipo A:  $C_0 = 710,0 - 720,0 \text{ uPtCo}$ )





**FIGURA 18 - Curvas de flotação para cor aparente referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 3 mg/L (Água Tipo B:  $C_0 = 722,5 - 762,5$  uPtCo)**

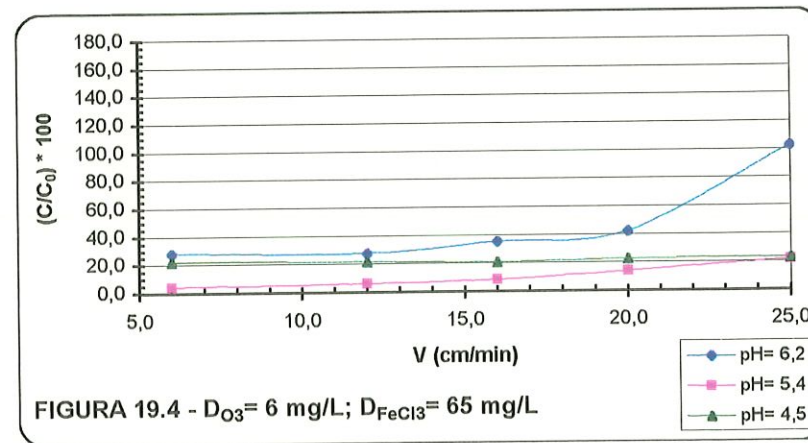
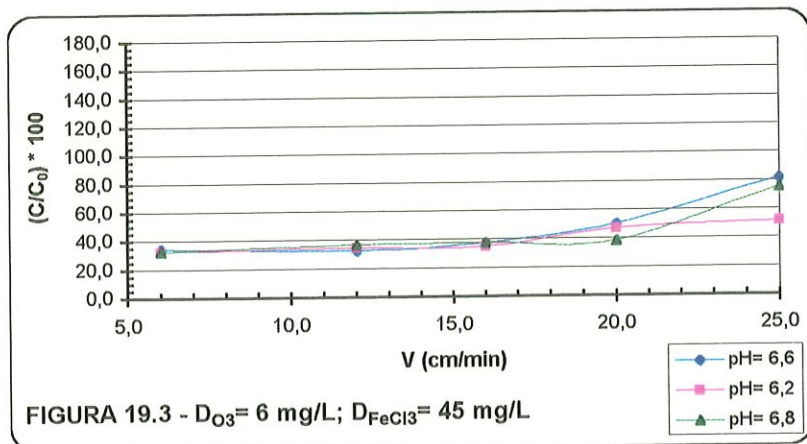
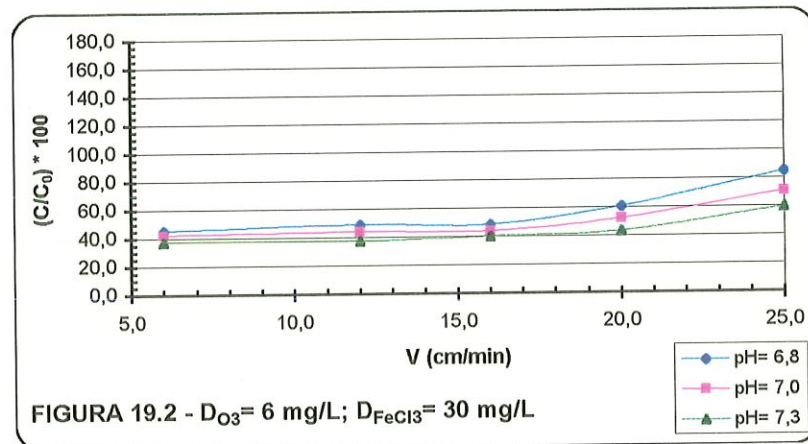
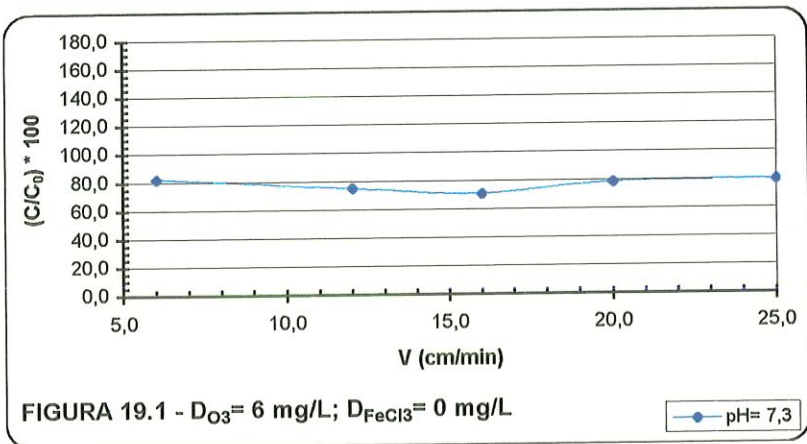


FIGURA 19 - Curvas de flotação para cor aparente referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 6 mg/L  
(Água Tipo C:  $C_0 = 650,0 - 654,0 \text{ uPtCo}$ )



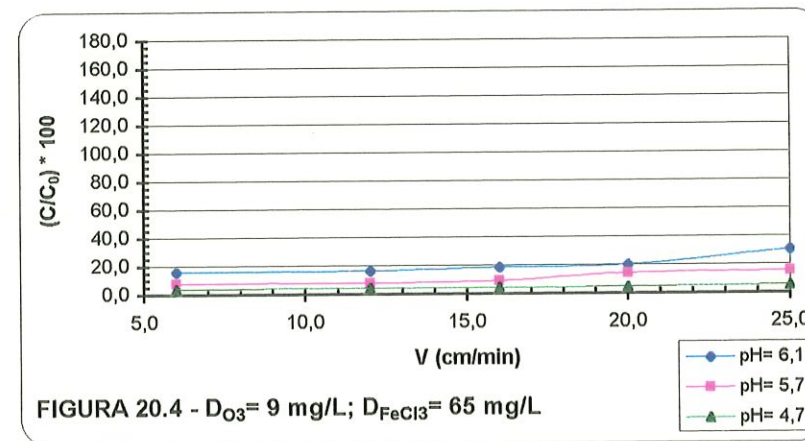
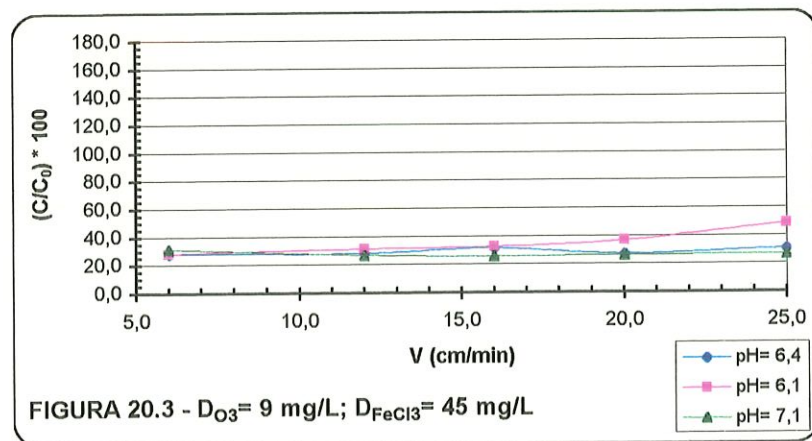
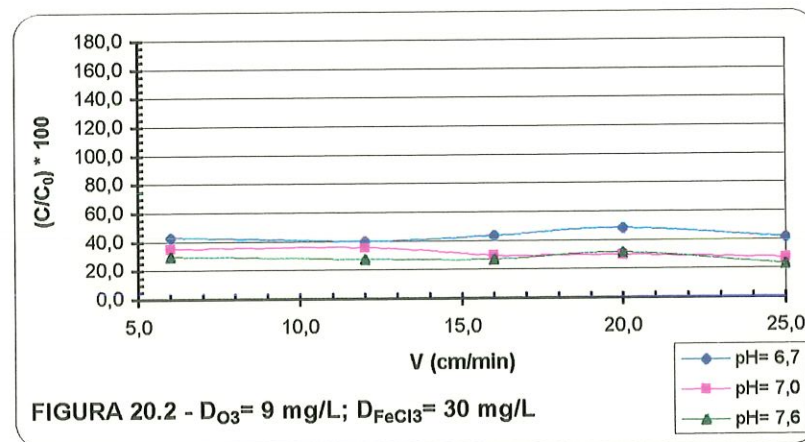
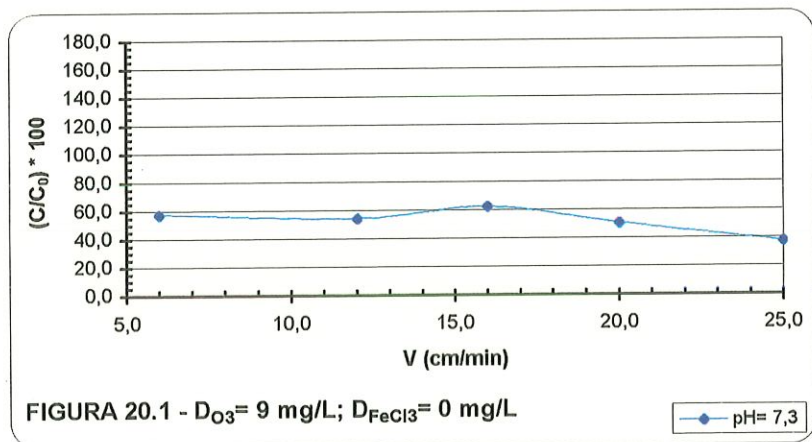


FIGURA 20 - Curvas de flotação para cor aparente referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 9 mg/L (Água Tipo D:  $C_0 = 745,0 - 762,5 \text{ uPtCo}$ )

Verificando-se as curvas de flotação para cor aparente, expostas na FIGURA 17 ( $D_{O_3} = 0$ ), observa-se que, para  $D_{FeCl_3} = 0$  (FIGURA 17.1), em toda a faixa de velocidade de flotação investigada, a eficiência de remoção de cor aparente permaneceu praticamente constante ( $R$  entre 20 % e 25 %). Por sua vez, quando  $D_{FeCl_3} = 30$  mg/L (FIGURA 17.2), observa-se que o valor de pH de 7,5 (maior valor estudado) proporcionou os melhores resultados de remoção de cor aparente ( $R \cong 60$  % para  $V = 12$  cm/min). Nota-se que, quando  $D_{FeCl_3} = 45$  mg/L (FIGURA 17.3), a eficiência de remoção de cor aparente apresentou-se, para todas as velocidades de flotação, melhor sob  $pH = 6,8$ , sendo que, para  $V = 12$  cm/min, a diferença na eficiência de remoção de cor aparente para toda a faixa de pH estudada é bem reduzida ( $R$  entre 50 % e 60 %). Verifica-se que, quando  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L (FIGURA 17.4), o valor de pH de 4,8 é o que fornece as melhores remoções de cor aparente, para todas as velocidades estudadas ( $R \cong 90$  % para  $V = 12$  cm/min). De acordo com a FIGURA 17, continua nítida a constatação de que as condições ótimas de flotação (remoção de cor), para o tipo de água estudado (sem a aplicação do ozônio), são aquelas em que se trabalham com valor de pH por volta de 5,0 com respectiva dosagem de coagulante de 65 mg/L.

Em se observando as curvas de flotação para cor aparente, apresentadas na FIGURA 18 ( $D_{O_3} = 3$  mg/L), nota-se que, para  $D_{FeCl_3} = 0$  (FIGURA 18.1), em toda a faixa de velocidade de flotação analisada, a eficiência de remoção de cor aparente variou entre 50 a 55 %. Quando  $D_{FeCl_3} = 30$  mg/L (FIGURA 18.2), observa-se que o valor de pH de 7,7 proporcionou os melhores resultados de remoção de cor aparente, com mínimas variações entre  $V = 6$  cm/min a  $V = 20$  cm/min ( $R$  entre 70 % e 75 %). Verifica-se que, quando  $D_{FeCl_3} = 45$  mg/L (FIGURA 18.3), a eficiência de remoção de cor aparente apresenta-se, para todas as velocidades de flotação, melhor com  $pH = 7,2$ , com exceção do caso em que  $V = 6$  cm/min, quando as remoções de cor aparente, para toda a faixa de pH estudada, são quase as mesmas ( $R$  entre 50 a 57 %), ao passo que, para  $V$  entre 6 e 16 cm/min, a diferença na eficiência de remoção de cor aparente para o



intervalo de pH entre 6,0 e 6,5 é praticamente nula. Fica claro observar que, quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 65 \text{ mg/L}$  (FIGURA 18.4), o valor de pH de 5,2 é o que fornece as melhores remoções de cor aparente, para todas as velocidades estudadas ( $R \cong 90 \%$  para  $V = 12 \text{ cm/min}$ ).

Ao serem investigadas as curvas de flotação mostradas na FIGURA 19 ( $D_{\text{O}_3} = 6 \text{ mg/L}$ ), verifica-se que, para  $D_{\text{FeCl}_3} = 0$  (FIGURA 19.1), em toda a faixa de velocidade de flotação analisada, a eficiência de remoção de cor aparente permaneceu aproximadamente inalterável ( $R \cong 20 \%$ ), sofrendo leve alteração para  $V = 16 \text{ cm/min}$  ( $R \cong 30 \%$ ). Quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 30 \text{ mg/L}$  (FIGURA 19.2), observa-se que o valor de pH de 7,3 propiciou ligeira melhora nos resultados de remoção de cor aparente, com poucas variações entre  $V = 6 \text{ cm/min}$  a  $V = 20 \text{ cm/min}$  ( $R$  entre 66 % e 76 %), fato também constatado para as demais curvas, referentes aos valores de pH de 7,0 e 6,8. Quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 45 \text{ mg/L}$  (FIGURA 19.3), nota-se que a eficiência de remoção de cor aparente mostra-se praticamente a mesma, para toda a faixa de pH estudada, relativa às velocidades de flotação entre 6 e 20 cm/min ( $R$  entre 50 e 70 %), sendo que a curva referente ao pH de 6,2 exibe o melhor resultado relativo a  $V = 25 \text{ cm/min}$ . De acordo com a FIGURA 19.4, observa-se que, quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 65 \text{ mg/L}$ , o valor de pH de 5,4 é o que fornece as melhores remoções de cor aparente, para todas as velocidades estudadas ( $R \cong 96 \%$  para  $V = 12 \text{ cm/min}$ ) e, para  $V = 25 \text{ cm/min}$ , as eficiências de remoção de cor aparente são aproximadamente iguais, para valores de pH de 4,5 e 5,4 ( $R \cong 80 \%$ ).

As curvas de flotação para cor aparente apresentadas na FIGURA 20 ( $D_{\text{O}_3} = 9 \text{ mg/L}$ ) mostram que, para  $D_{\text{FeCl}_3} = 0$  (FIGURA 20.1), para toda a faixa de velocidade de flotação analisada, a eficiência de remoção de cor aparente variou entre 40 a 60 %. Para  $D_{\text{FeCl}_3} = 30 \text{ mg/L}$  (FIGURA 20.2), nota-se que os valores de pH de 7,0 e 7,6 forneceram os melhores resultados de remoção de cor aparente, com poucas variações entre  $V = 16 \text{ cm/min}$  a  $V = 25 \text{ cm/min}$  ( $R$  entre 65 % e 75 %). Verifica-se que, quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 45 \text{ mg/L}$  (FIGURA 20.3), a eficiência de remoção de cor aparente exibe-se, para todas as velocidades de flotação, a mesma ( $R \cong 70 \%$ ), para todos os valores

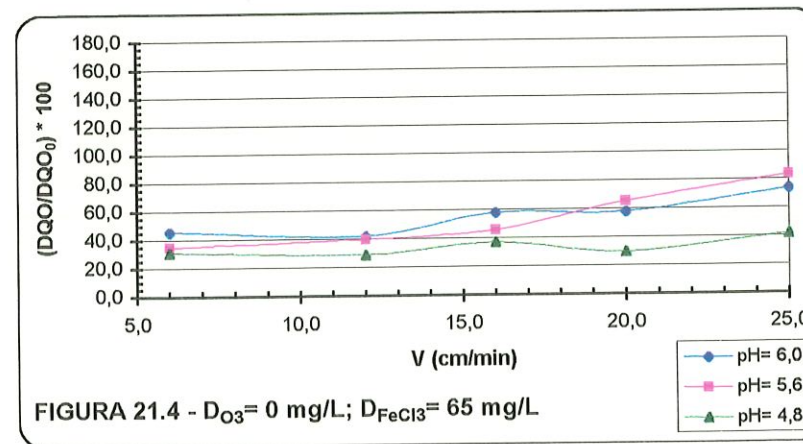
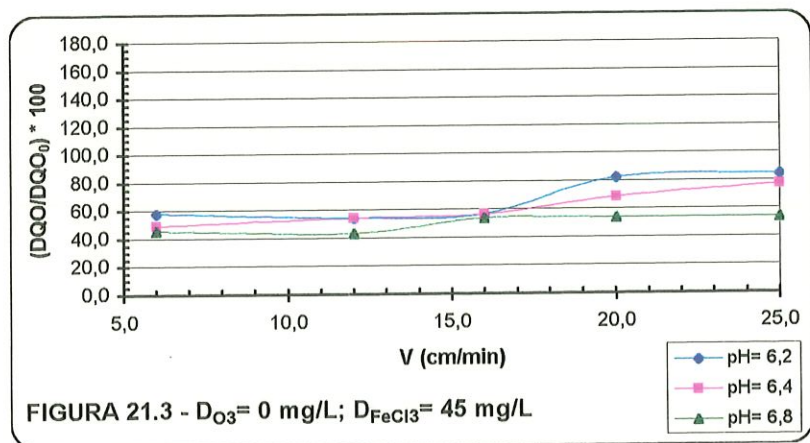
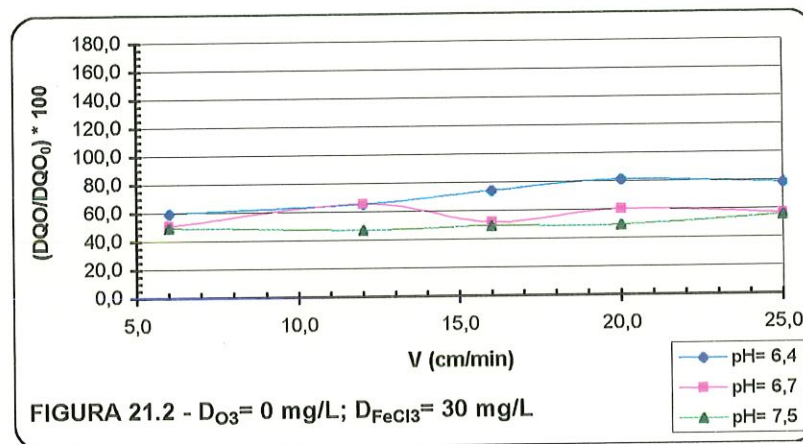
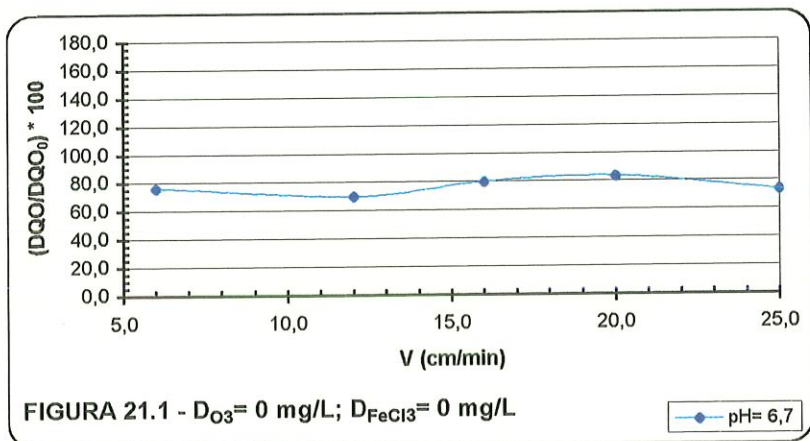
de pH, até a velocidade de flotação igual a 16 cm/min, quando a curva referente ao pH de 6,1 começa a sofrer leve alteração, diminuindo o valor da eficiência de remoção de cor aparente para, aproximadamente, 50 %. Na FIGURA 20.4, pode-se observar que, quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 65 \text{ mg/L}$ , as eficiências de remoção de cor aparente para todas as velocidades de flotação investigadas encontram-se por volta de 80 a 96 %. O que se observa é uma leve alteração da curva de pH igual a 6,1, para a velocidade de flotação de 25 cm/min ( $R \cong 70 \%$ ). As diferenças entre os valores de remoção de cor aparente para pH de 4,7 e 5,7 é muito pequena, sobretudo quando a velocidade de flotação encontra-se entre 6 e 16 cm/min. Ainda assim, a curva referente ao pH de 4,7 apresenta-se superior, em termos de remoção ( $R$  entre 95 e 96 %).

Desse modo, examinando-se as curvas de flotação para cor aparente relativas à primeira fase do presente trabalho, novamente se observa que os melhores resultados são proporcionados quando se aplicam dosagem de ozônio de 9 mg/L e dosagem de cloreto férrico de 65 mg/L, para todas as velocidades de flotação (vide FIGURA 20.4).

Verifica-se também, que as curvas de remoção de cor tendem a diminuir a oscilação, em função da velocidade, à medida em que se atinge a dosagem ótima de oxidante.

Seguem-se as curvas de flotação relacionadas à remoção de DQO (FIGURA 21 a FIGURA 24).





**FIGURA 21 - Curvas de flotação para DQO referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 0 mg/L (Água Tipo A:  $DQO_0 = 239,4 \text{ mg/L}$ )**

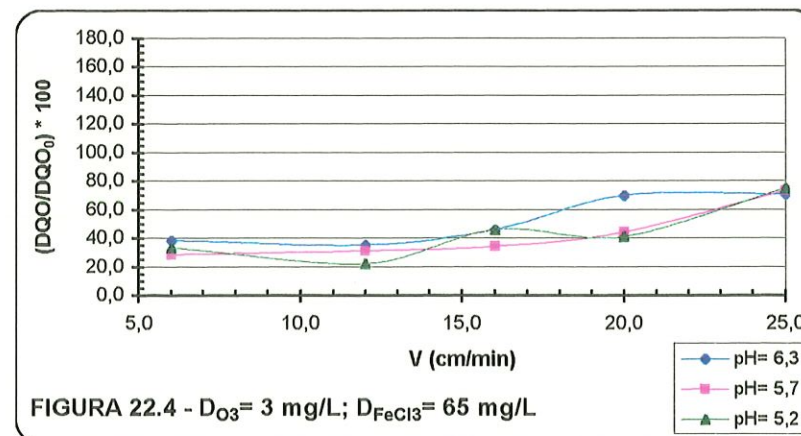
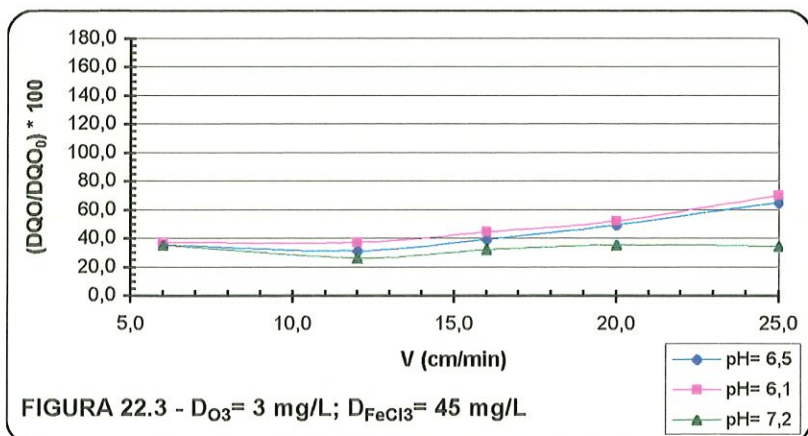
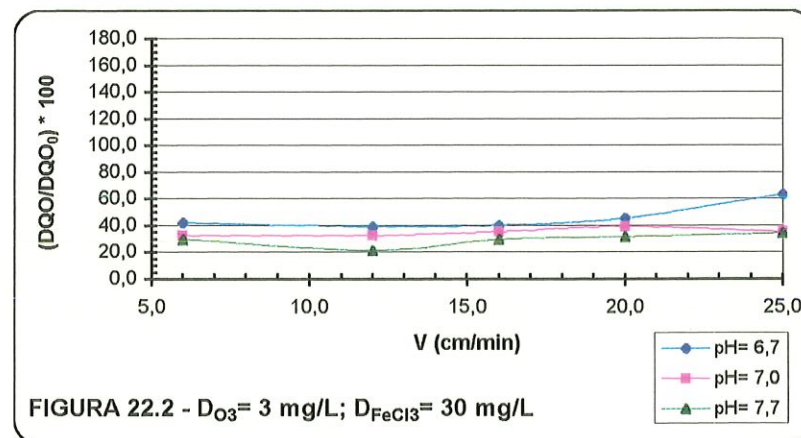
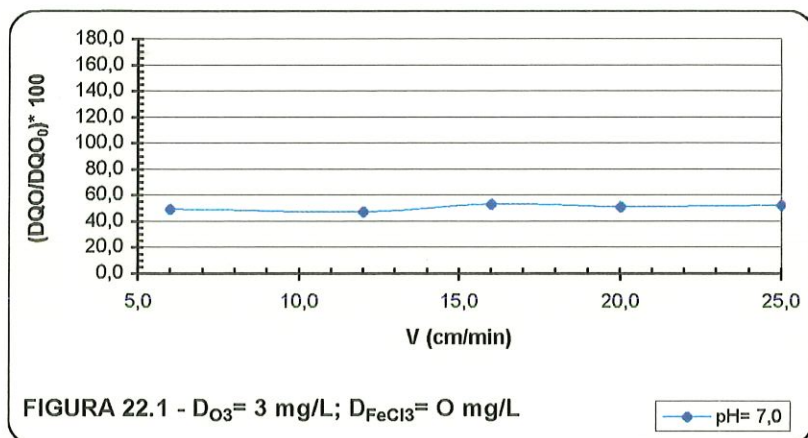


FIGURA 22 - Curvas de flotação para DQO referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 3 mg/L (Água Tipo B:  $DQO_0 = 294,0 \text{ mg/L}$ )



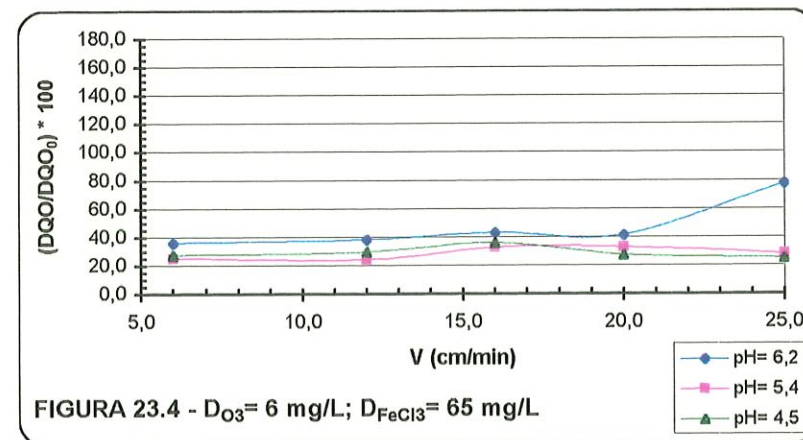
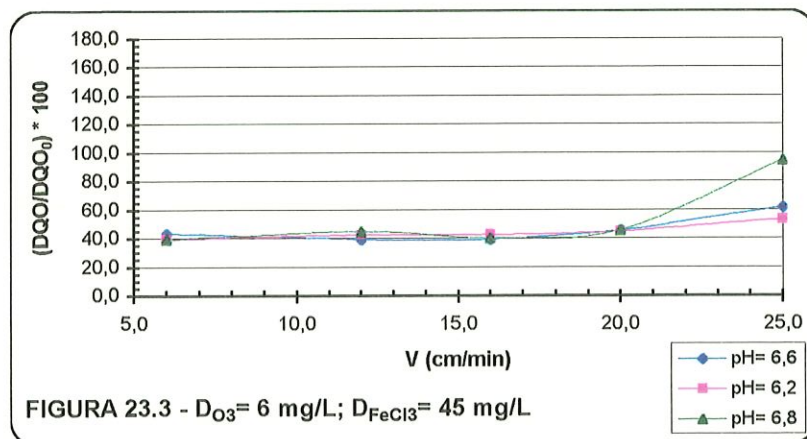
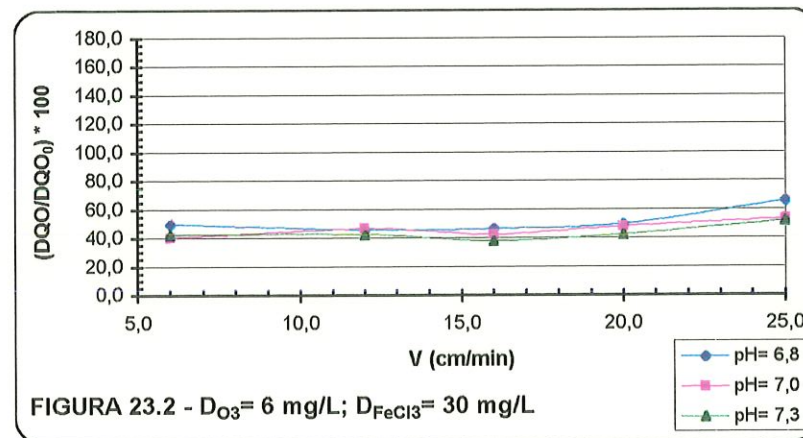
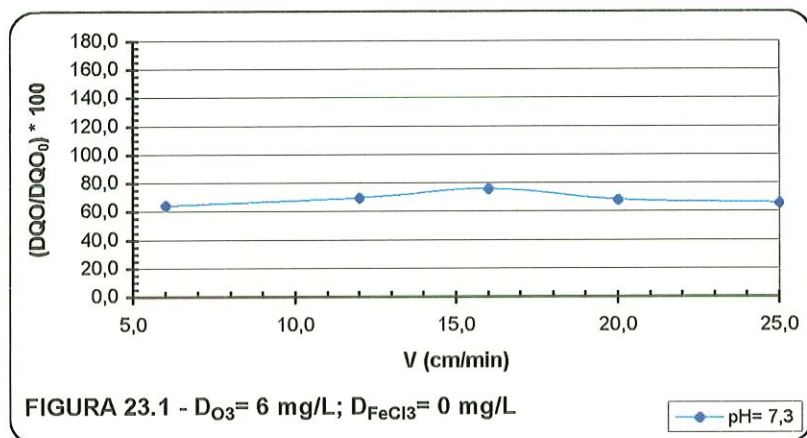


FIGURA 23 - Curvas de flotação para DQO referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio= 6 mg/L (Água Tipo C:  $DQO_0 = 272,0 \text{ mg/L}$ )

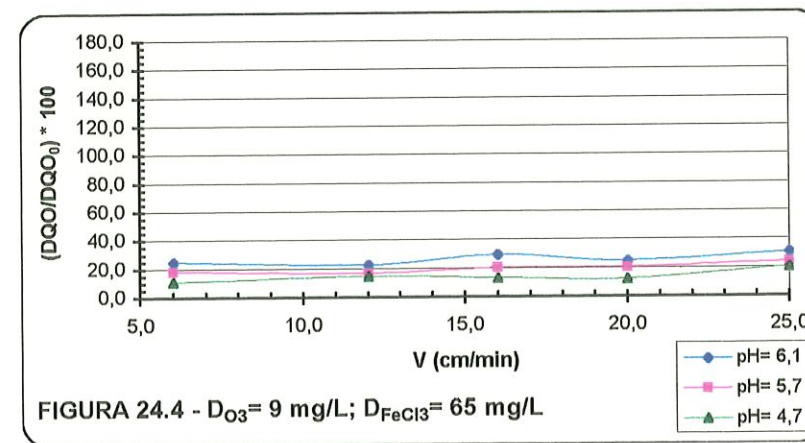
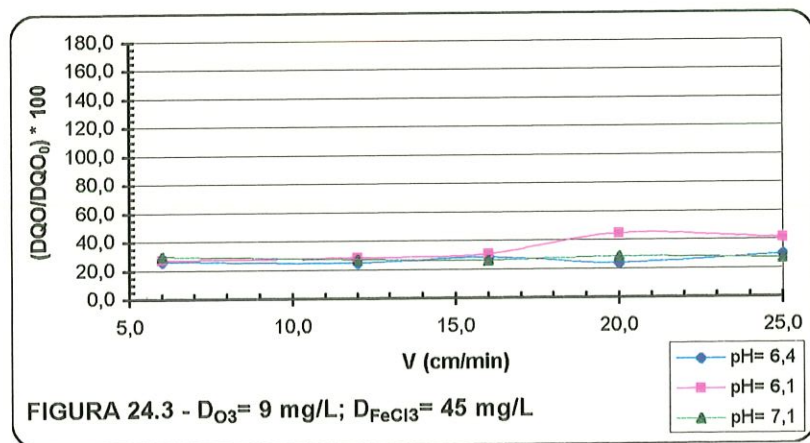
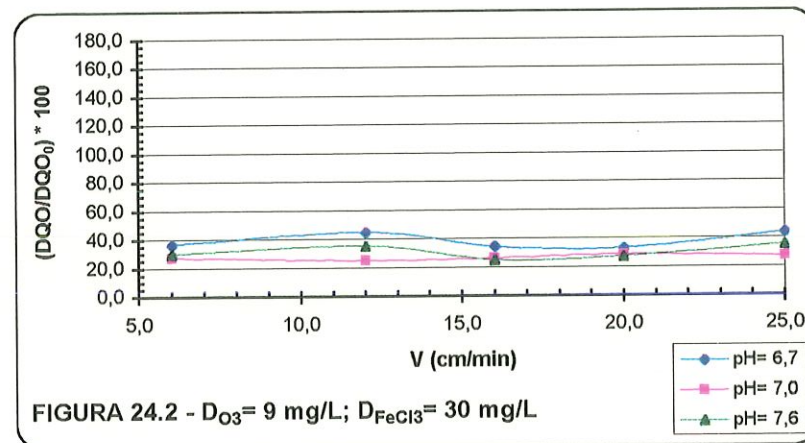
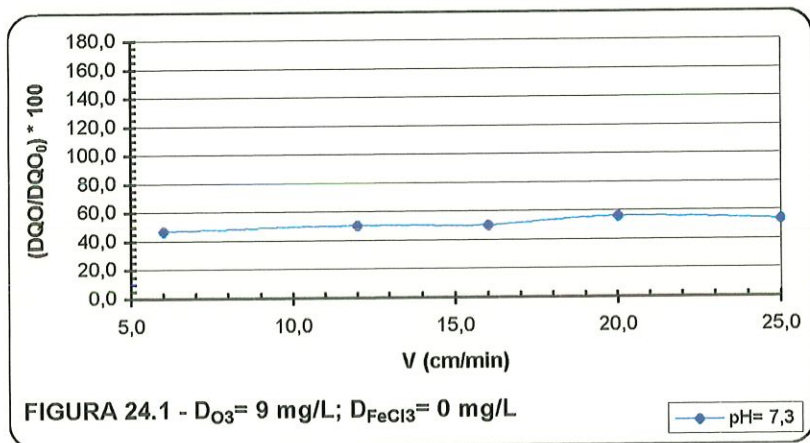


FIGURA 24 - Curvas de flotação para DQO referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 9 mg/L  
(Água Tipo D:  $DQO_0 = 251,0 \text{ mg/L}$ )



Ao serem verificadas as curvas de flotação para DQO, ilustradas na FIGURA 21 ( $D_{O_3} = 0$ ), observa-se que, para  $D_{FeCl_3} = 0$  (FIGURA 21.1), em toda a faixa de velocidade de flotação investigada, a eficiência de remoção de DQO permaneceu praticamente constante (R entre 20 % e 30 %). Quando  $D_{FeCl_3} = 30$  mg/L (FIGURA 21.2), observa-se que o valor de pH de 7,5 (maior valor estudado) proporcionou os melhores resultados de remoção de DQO (R entre 45 e 50 %), para todas as velocidades de flotação sendo que, para as velocidades iguais a 6, 16 e 25 cm/min, seus valores de remoção de DQO são idênticos àqueles relativos ao pH de 6,7. Por sua vez, nota-se que, quando  $D_{FeCl_3} = 45$  mg/L (FIGURA 21.3), a eficiência de remoção de DQO apresentou-se, para todas as velocidades de flotação, melhor sob pH= 6,8, sendo que, para  $V = 6$  e 16 cm/min, a diferença na eficiência de remoção de DQO para toda a faixa de pH estudada é bem reduzida. Verifica-se que, quando  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L (FIGURA 21.4), o valor de pH de 4,8 é o que fornece as melhores remoções de DQO, para todas as velocidades estudadas ( $R \cong 70$  % para  $V = 6, 12$  e 20 cm/min). De acordo com a FIGURA 21, pode-se novamente perceber que as condições ótimas de flotação, para o tipo de água estudado (sem a aplicação do ozônio), são aquelas em que se trabalham com valor de pH por volta de 5,0 e dosagem de coagulante igual a 65 mg/L.

Observando-se as curvas de flotação para DQO, apresentadas na FIGURA 22 ( $D_{O_3} = 3$  mg/L), nota-se que, para  $D_{FeCl_3} = 0$  (FIGURA 22.1), em toda a faixa de velocidade de flotação investigada, a eficiência de remoção de DQO variou entre 50 a 55 %. Quando  $D_{FeCl_3} = 30$  mg/L (FIGURA 22.2), observa-se que o valor de pH de 7,7 proporcionou os melhores resultados de remoção de DQO, com mínimas variações entre  $V = 6$  cm/min a  $V = 25$  cm/min (R entre 70 % e 75 %), sendo que tais valores não são significativamente maiores que aqueles proporcionados pelos demais valores de pH. Verifica-se que, quando  $D_{FeCl_3} = 45$  mg/L (FIGURA 22.3), a eficiência de remoção de DQO apresenta-se, para todas as velocidades de flotação, melhor com pH= 7,2, com exceção do caso em que  $V = 6$  cm/min, quando as remoções de DQO, para toda a faixa de pH estudada, são quase

as mesmas ( $R \cong 75\%$ ), ao passo que, para  $V$  entre 6 e 25 cm/min, a diferença na eficiência de remoção de DQO para o intervalo de pH entre 6,0 e 6,5 é muito reduzida (da ordem de 6%). Observa-se que, quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 65$  mg/L (FIGURA 22.4), a curva referente ao pH de 5,2 é bem oscilante, devido, à primeira instância, a possíveis falhas experimentais. Ainda assim, verifica-se que para  $V = 12$  cm/min, este valor de pH fornece o melhor resultado de eficiência de remoção de DQO ( $R \cong 78\%$ ).

Examinando-se as curvas de flotação mostradas na FIGURA 23 ( $D_{\text{O}_3} = 6$  mg/L), verifica-se que, para  $D_{\text{FeCl}_3} = 0$  (FIGURA 23.1), em toda a faixa de velocidade de flotação analisada, a eficiência de remoção de DQO permaneceu quase inalterável ( $R \cong 35\%$ ), sofrendo leve alteração para  $V = 16$  cm/min ( $R \cong 25\%$ ). Quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 30$  mg/L (FIGURA 23.2), observa-se que o valor de pH de 7,3 propiciou ligeira melhora nos resultados de remoção de DQO, com poucas variações entre  $V = 6$  cm/min a  $V = 20$  cm/min ( $R \cong 58\%$ ), fato também constatado para as demais curvas, referentes aos valores de pH de 7,0 e 6,8. Por sua vez, quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 45$  mg/L (FIGURA 23.3), nota-se que a eficiência de remoção de DQO mostra-se praticamente a mesma, para toda a faixa de pH estudada, relativa às velocidades de flotação entre 6 e 20 cm/min ( $R$  entre 55 e 60%), sendo que a curva referente ao pH de 6,2 exibe o melhor resultado relativo a  $V = 25$  cm/min. De acordo com a FIGURA 23.4, observa-se que, quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 65$  mg/L, os valores de pH de 4,5 e 5,4 fornecem as melhores remoções de DQO, para todas as velocidades estudadas ( $R \cong 76\%$  para pH= 5,4  $R \cong 71\%$  para pH= 4,5, com  $V = 12$  cm/min) e, para  $V = 6, 16$  e 25 cm/min, as eficiências de remoção de DQO são aproximadamente iguais, para valores de pH de 4,5 e 5,4.

As curvas de flotação para DQO apresentadas na FIGURA 24 ( $D_{\text{O}_3} = 9$  mg/L) mostram que, para  $D_{\text{FeCl}_3} = 0$  (FIGURA 24.1), para toda a faixa de velocidade de flotação analisada, a eficiência de remoção de DQO variou entre 68 a 73%. Para  $D_{\text{FeCl}_3} = 30$  mg/L (FIGURA 24.2), nota-se que os valores de pH de 7,0 e 7,6 forneceram os melhores resultados de remoção de DQO para  $V = 6, 16$  e 25 cm/min ( $R \cong 74\%$ ), com mínimas variações entre



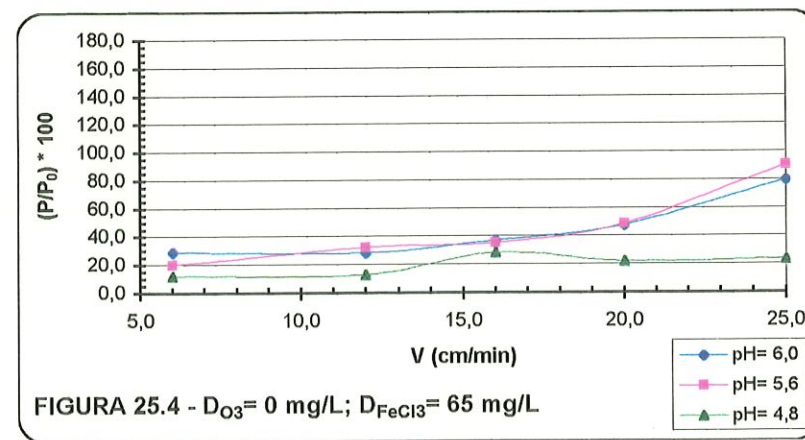
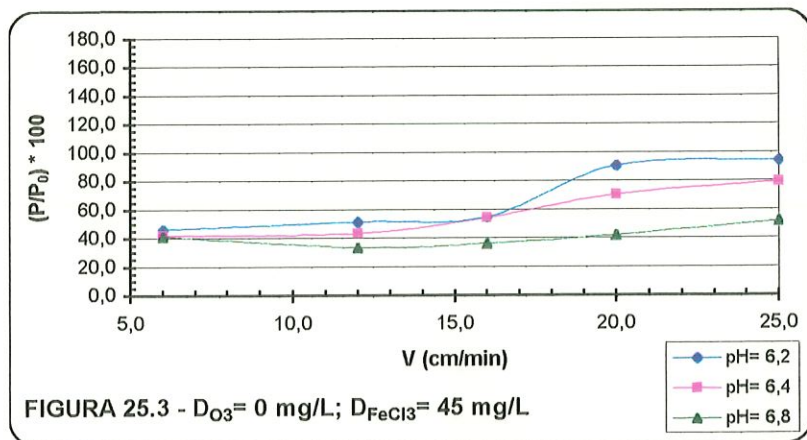
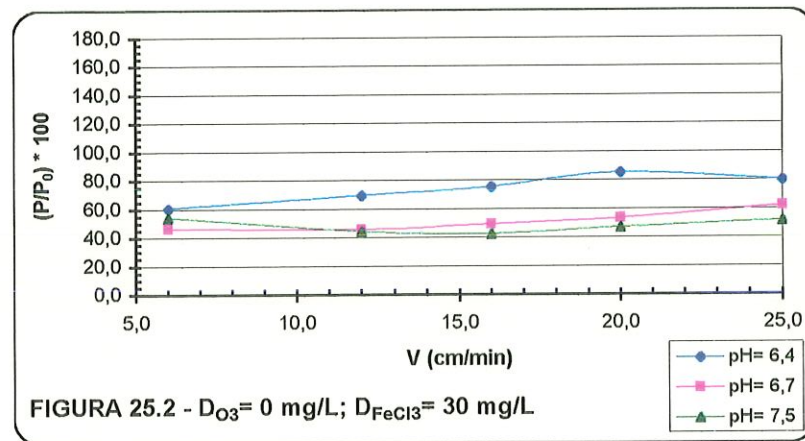
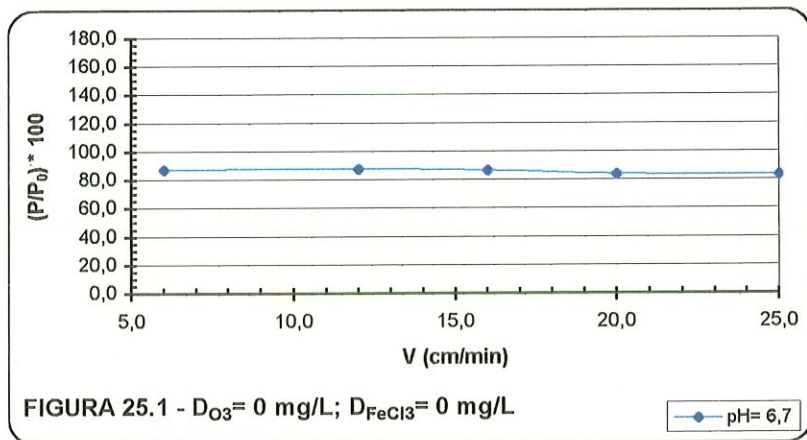
$V = 6$  e  $25$  cm/min, para  $\text{pH} = 7,0$  ( $R$  entre  $70\%$  e  $75\%$ ). Verifica-se que, quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 45$  mg/L (FIGURA 24.3), a eficiência de remoção de DQO exibe-se, para todas as velocidades de flotação, praticamente a mesma ( $R \cong 72\%$ ), para todos os valores de  $\text{pH}$ , até a velocidade de flotação igual a  $16$  cm/min, quando a curva referente ao  $\text{pH}$  de  $6,1$  começa a sofrer leve alteração, diminuindo o valor da eficiência de remoção de DQO para aproximadamente  $62\%$  e  $V = 25$  cm/min. Na FIGURA 24.4, observa-se que, quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 65$  mg/L, as eficiências de remoção de DQO para todas as velocidades de flotação investigadas encontram-se por volta de  $80$  a  $90\%$ , sob  $\text{pH} = 4,7$ . O que se nota é uma leve diferença desses valores para aqueles, relacionados às demais curvas (da ordem de  $20\%$ ), sobretudo quando  $V = 12$  cm/min. Mesmo assim, a curva referente ao  $\text{pH}$  de  $4,7$  apresenta-se superior, em termos de remoção de DQO.

Dessa maneira, pode-se perceber que, para o parâmetro DQO, as melhores remoções, correspondentes à primeira etapa experimental, encontram-se também na faixa de  $\text{pH}$  de  $5,0$  a  $5,5$ , com dosagem de cloreto férrico igual a  $65$  mg/L e dosagem de ozônio igual a  $9$  mg/L (vide FIGURA 24.4).

De acordo com a FIGURA 21, observa-se que a condição ótima de flotação referente à DQO é, ainda, aquela em que o  $\text{pH}$  está compreendido entre  $5,0$  e  $5,5$  e a dosagem de coagulante é igual a  $65$  mg/L.

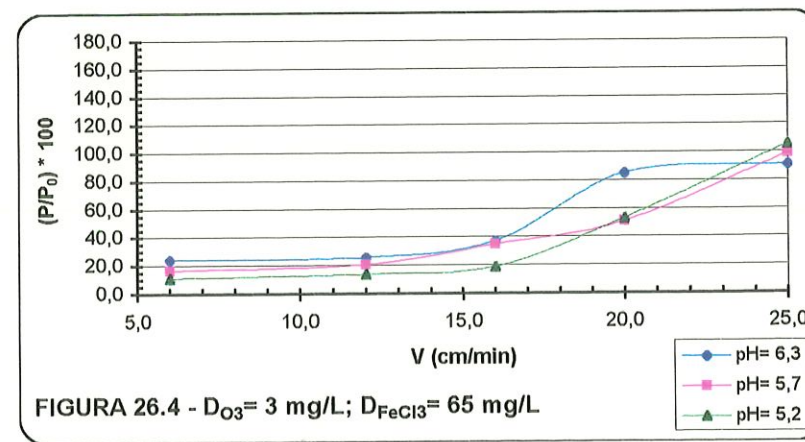
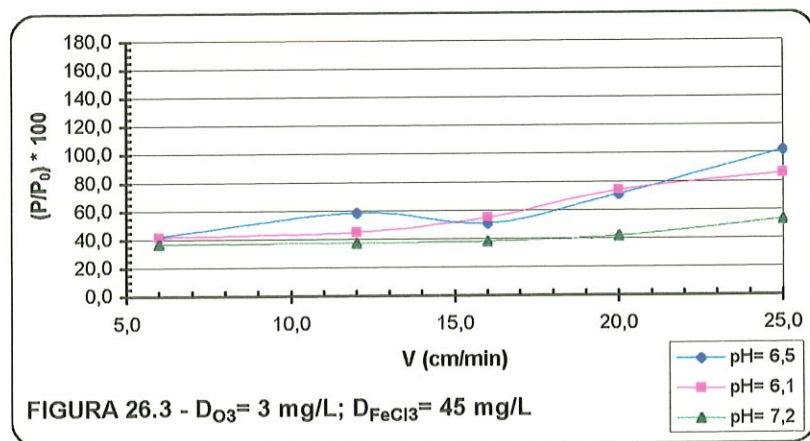
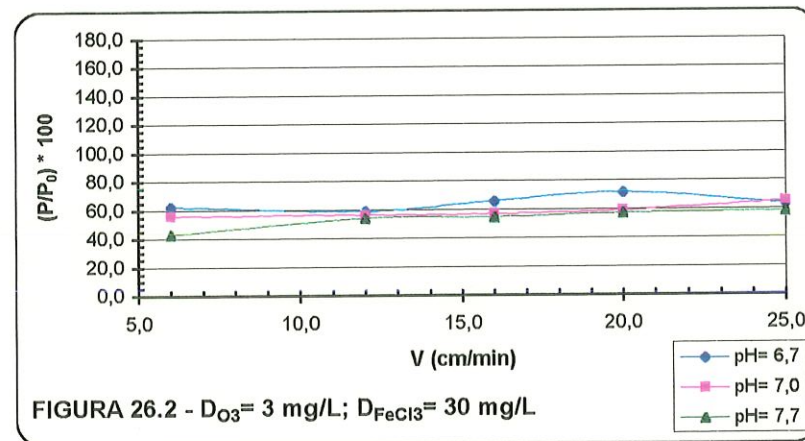
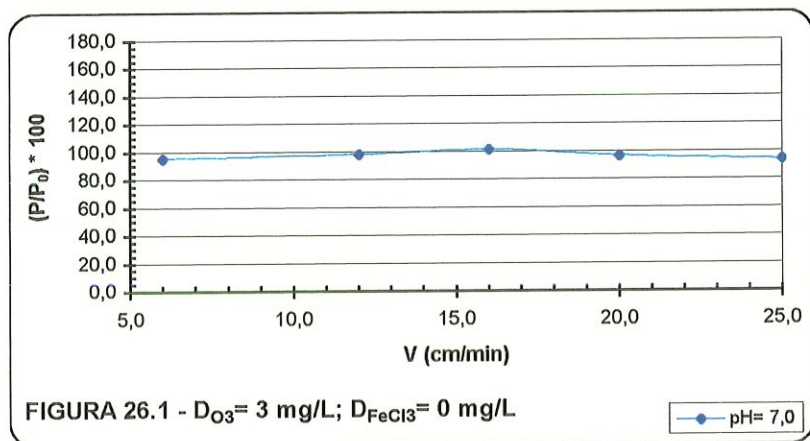
Nota-se que a variação da velocidade de flotação tende a não oferecer grandes diferenças em seus valores, à medida em que se aumenta a dosagem de ozônio, principalmente quando se trabalha nas condições ótimas de flotação.

As curvas concernentes à remoção de fosfato total são apresentadas a seguir (FIGURA 25 a FIGURA 28).



**FIGURA 25 - Curvas de flotação para fosfato total referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 0 mg/L (Água Tipo A:  $P_0 = 20,6 \text{ mg/L}$ )**





**FIGURA 26 - Curvas de flotação para fosfato total referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 3 mg/L (Água Tipo B: P<sub>0</sub> = 21,9 mg/L)**

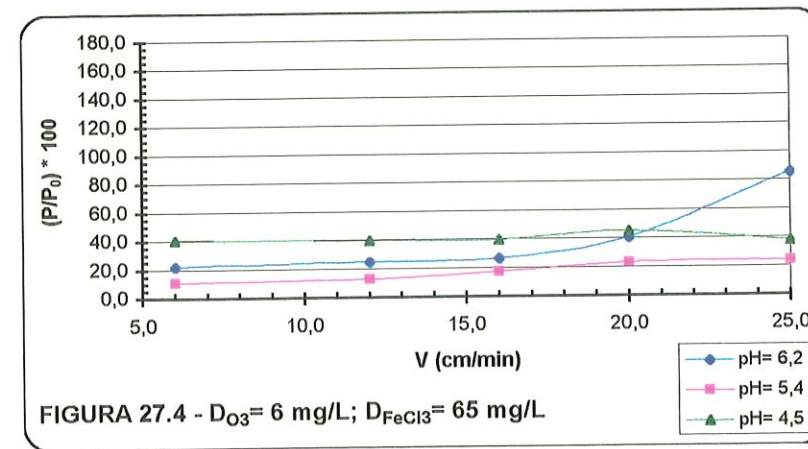
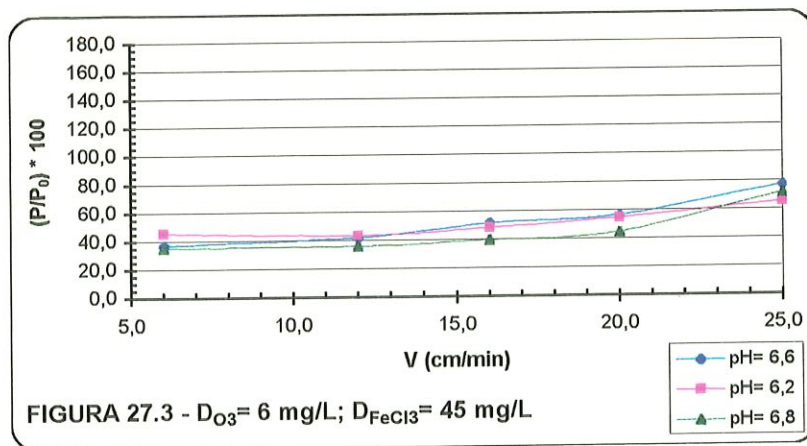
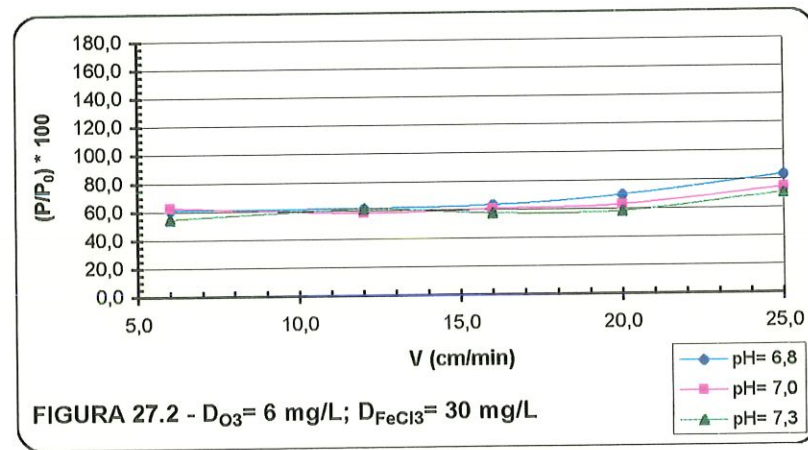
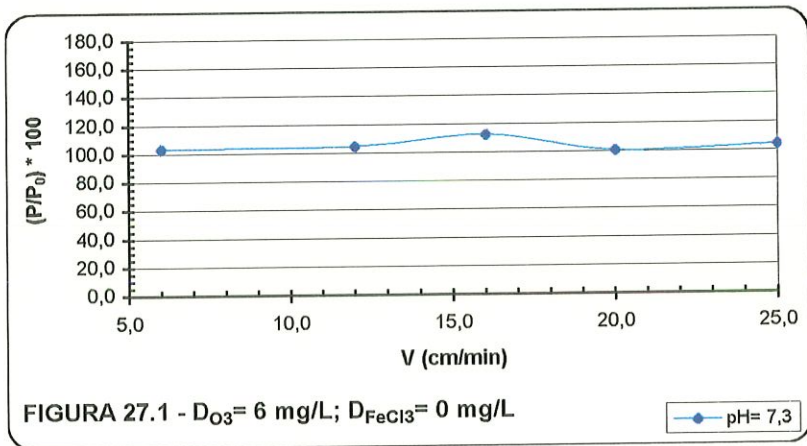


FIGURA 27 - Curvas de flotação para fosfato total referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 6 mg/L  
(Água Tipo C:  $P_0 = 20,6 \text{ mg/L}$ )





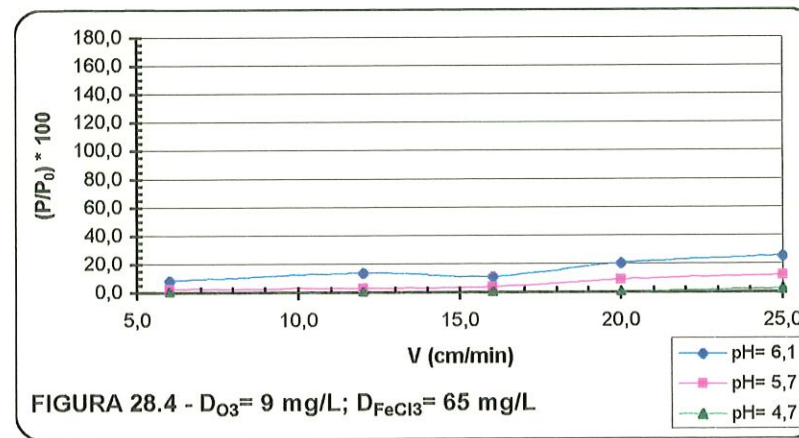
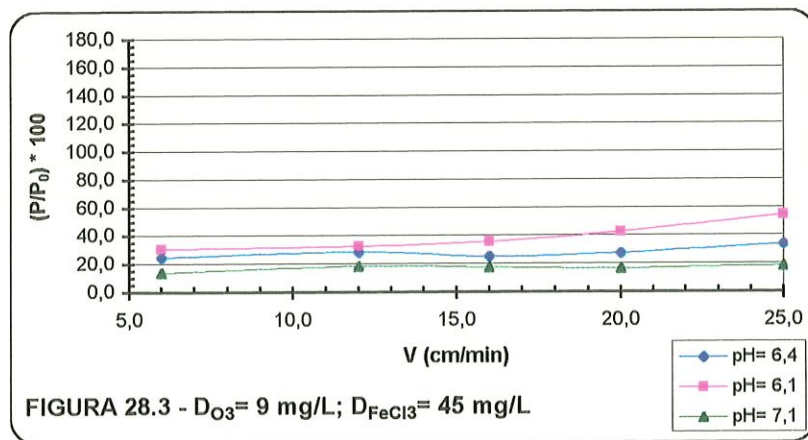
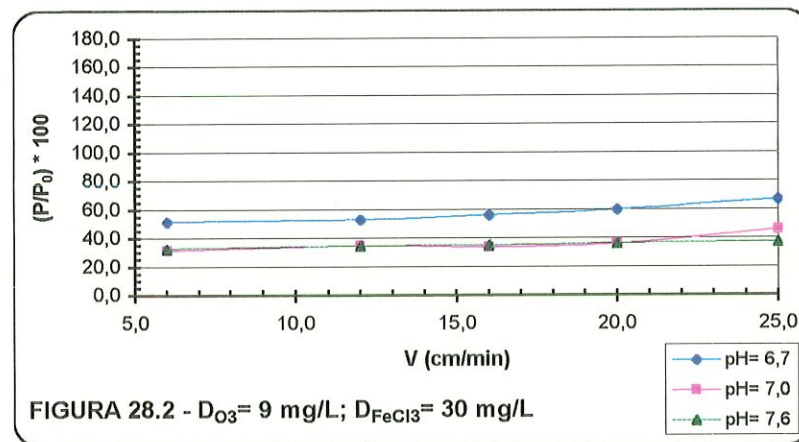
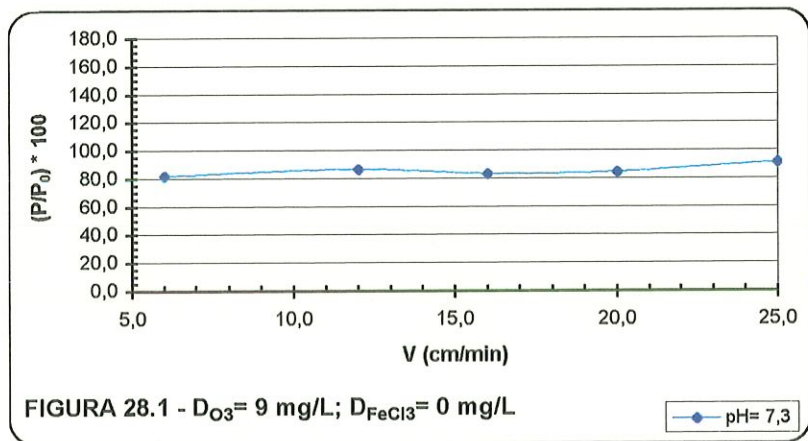


FIGURA 28 - Curvas de flotação para fosfato total referentes à primeira etapa de ensaios com dosagem de ozônio = 9 mg/L (Água Tipo D: P<sub>0</sub> = 15,2 mg/L)

Investigando-se as curvas de flotação para P total, ilustradas na FIGURA 25 ( $D_{O_3} = 0$ ), verifica-se que, para  $D_{FeCl_3} = 0$  (FIGURA 25.1), em toda a faixa de velocidade de flotação investigada, a eficiência de remoção de P total permaneceu praticamente constante (R entre 12 % e 18 %). Quando  $D_{FeCl_3} = 30$  mg/L (FIGURA 25.2), observa-se que o valor de pH de 7,5 proporcionou os melhores resultados de remoção de P total (R entre 40 e 52 %), para todas as velocidades de flotação sendo que, para a velocidade igual a 12 cm/min, seu valor de remoção de P total é idêntico àquele relativo ao pH de 6,7. Para as demais velocidades de flotação, as curvas referentes aos valores de pH de 7,5 e 6,7 encontram-se muito próximas umas das outras (diferença máxima da ordem de 10 %). Por sua vez, nota-se que, quando  $D_{FeCl_3} = 45$  mg/L (FIGURA 25.3), a eficiência de remoção de P total apresentou-se, para todas as velocidades de flotação, melhor sob pH= 6,8, sendo que, para  $V = 6$  e 12 cm/min, a diferença na eficiência de remoção de P total para toda a faixa de pH estudada é bem reduzida ( $R \cong 55$  %). Verifica-se que, quando  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L (FIGURA 25.4), o valor de pH de 4,8 é o que fornece as melhores remoções de P total, para todas as velocidades estudadas ( $R \cong 90$  % para  $V = 6$  e 12 cm/min), sendo que as curvas concernentes aos valores de pH iguais a 5,6 e 6,0 apresentam-se muito próximas umas das outras. De acordo com a FIGURA 25, mais uma vez se averigua que as condições ótimas de flotação, para o tipo de água estudado (sem a aplicação do ozônio), são aquelas em que se trabalham com valor de pH por volta de 5,0 e dosagem de coagulante igual a 65 mg/L.

Em se observando as curvas de flotação para P total, apresentadas na FIGURA 26 ( $D_{O_3} = 3$  mg/L), nota-se que, para  $D_{FeCl_3} = 0$  (FIGURA 26.1), em toda a faixa de velocidade de flotação investigada, a eficiência de remoção de P total foi muito baixa, variando de 0 a 5 %. Quando  $D_{FeCl_3} = 30$  mg/L (FIGURA 26.2), observa-se que o valor de pH de 7,7 proporcionou os melhores resultados de remoção de P total, para  $V = 6$  cm/min e propiciou mínimas variações entre  $V = 12$  e 25 cm/min em relação à curva referente ao pH de 7,0 (R entre 40 e 47 %) que, por sua vez, mostrou-se pouco diferente da curva relativa ao pH igual a 6,7, para  $V = 6, 12$  e 25 cm/min (R entre 35 %



e 45 %). Verifica-se que, quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 45 \text{ mg/L}$  (FIGURA 26.3), a eficiência de remoção de P total apresenta-se, para todas as velocidades de flotação, melhor com  $\text{pH} = 7,2$ , com exceção do caso em que  $V = 6 \text{ cm/min}$ , quando as remoções de P total, para toda a faixa de pH estudada, são quase as mesmas ( $R$  entre 57 e 65 %), ao passo que, para  $V = 16$  e  $20 \text{ cm/min}$ , a diferença na eficiência de remoção de P total para o intervalo de pH entre 6,0 e 6,5 é quase nula. Observa-se que, quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 65 \text{ mg/L}$  (FIGURA 26.4), para velocidade de flotação entre 6 e 16  $\text{cm/min}$ , o valor de pH de 5,2 fornece os melhores resultados de eficiência de remoção de P total ( $R \cong 93 \%$  para  $V = 12 \text{ cm/min}$ ).

Examinando-se as curvas de flotação mostradas na FIGURA 27 ( $D_{\text{O}_3} = 6 \text{ mg/L}$ ), verifica-se que, para  $D_{\text{FeCl}_3} = 0$  (FIGURA 27.1), em toda a faixa de velocidade de flotação analisada, a eficiência de remoção de P total não foi obtida. Quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 30 \text{ mg/L}$  (FIGURA 27.2), observa-se que o valor de pH de 7,3 propiciou ligeira melhora nos resultados de remoção de P total apenas para  $V = 25 \text{ cm/min}$ , sendo que para as demais velocidades de flotação, as curvas referentes à faixa de valores de pH estudada para este caso, comportaram-se de forma praticamente idêntica, sofrendo alterações somente para  $\text{pH} = 6,8$ , quando  $V = 25 \text{ cm/min}$  ( $R \cong 40 \%$  para  $V = 12 \text{ cm/min}$ ). Por sua vez, quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 45 \text{ mg/L}$  (FIGURA 27.3), nota-se que a eficiência de remoção de P total mostra-se praticamente a mesma, para toda a faixa de pH estudada, relativa às velocidades de flotação entre 6 e 12  $\text{cm/min}$ , sendo que a curva referente ao pH de 6,8 exibe, ligeiramente, os melhores resultados entre  $V = 6$  e  $20 \text{ cm/min}$  ( $R \cong 65 \%$ , para  $\text{pH} = 6,8$ ). Em acordo com a FIGURA 27.4, observa-se que, quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 65 \text{ mg/L}$ , o valor de pH de 5,4 fornece a melhor remoção de P total, para todas as velocidades estudadas ( $R \cong 87 \%$  para  $\text{pH} = 5,4$ , com  $V = 12 \text{ cm/min}$ ).

As curvas de flotação para P total apresentadas na FIGURA 28 ( $D_{\text{O}_3} = 9 \text{ mg/L}$ ) mostram que, para  $D_{\text{FeCl}_3} = 0$  (FIGURA 28.1), em toda a faixa de velocidade de flotação analisada, a eficiência de remoção de P total variou aproximadamente entre 10 e 20 %. Para  $D_{\text{FeCl}_3} = 30 \text{ mg/L}$  (FIGURA 28.2), nota-se que os valores de pH de 7,0 e 7,6 forneceram identicamente

os melhores resultados de remoção de P total para velocidade de flotação entre 6 e 20 cm/min (R entre 65 e 68 %), sendo que, para  $V = 25$  cm/min o pH de 7,6 ofereceu, ligeiramente, valor mais favorável que aquele obtido com pH = 7,0. Verifica-se que, quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 45$  mg/L (FIGURA 28.3), a eficiência de remoção de P total exibe-se, para todas as velocidades de flotação, melhor para pH = 7,1 ( $R \cong 82$  %, para  $V = 12$  cm/min). Na FIGURA 28.4, observa-se que, quando  $D_{\text{FeCl}_3} = 65$  mg/L, as eficiências de remoção de P total são praticamente as mesmas para os valores de pH de 4,7 e 5,7, dentro da faixa de velocidade compreendida entre 6 e 16 cm/min, ao passo que a curva relativa ao pH de 5,7 sofre ligeira alteração entre as velocidades de flotação de 16 a 25 cm/min, resultando na diminuição da eficiência de remoção de P total. Já a curva referente ao pH igual a 4,7 permanece aproximadamente inalterada para todas as velocidades de flotação investigadas ( $R \cong 0$  %, para  $V = 12$  cm/min).

Observa-se, mais uma vez, que as melhores remoções de fosfato total para a primeira fase do presente trabalho, são verificadas quando as dosagens de ozônio e de cloreto férrico são as máximas utilizadas ( $D_{\text{O}_3} = 9$  mg/L e  $D_{\text{FeCl}_3} = 65$  mg/L) e o pH está entre 5,0 e 5,5, para todas as velocidades de flotação (vide FIGURA 28.4).

Conforme constatado para os demais parâmetros (turbidez, cor e DQO) o que se pode notar, pela FIGURA 25 é que as condições ótimas de remoção de fosfato por flotação são aquelas em que se trabalha com pH na faixa compreendida entre 5,0 e 5,5 e dosagem de coagulante igual a 65 mg/L.

### 5.3.1. Análise geral dos resultados da primeira etapa de ensaios

Como referido anteriormente, o primeiro estágio de ensaios do presente estudo teve como objetivo principal mostrar, de um modo geral, o



comportamento do ozônio frente a variações de pH e dosagem de coagulante.

Primeiramente, observando-se as curvas de flotação expostas, pode-se dizer que, em se aumentando as dosagens de ozônio aplicadas, verifica-se que há uma melhora nas remoções dos parâmetros analisados, principalmente quando a dosagem de coagulante também aumenta.

É interessante observar que quando não se trabalha nas condições ótimas de flotação, ou seja, quando a dosagem de coagulante é nula e o controle do pH não é feito, o ozônio pouco atua na melhora da qualidade do efluente pós-tratado. Para este caso, as variações na velocidade de flotação são insignificantes.

Os valores “controlados” de pH, escolhidos para serem investigados nessa primeira etapa da pesquisa, não eram os mesmos para cada dosagem de cloreto férrico (vide FIGURA 8, no Capítulo 4), pois como já explicado, basearam-se em dados conclusivos de pesquisa anterior (PENETRA (1998)). Assim, com vistas a proporcionar uma análise mais acurada dos dados obtidos, serão expostas figuras, na forma de quadros elucidativos, contendo os resultados alcançados para os valores de pH mais significativos ( 5,0, 5,5, 6,5 e 7,5) os quais serão utilizados nas próximas etapas.

Faz-se necessário explicar que, a primeira fase deste estudo não ofereceu resultados concludentes, mas apenas embasamento suficiente para a programação dos ensaios subseqüentes. Com sua execução, foi possível alertar-se da necessidade de se investigar todas as dosagens de ozônio num único dia de trabalho, a fim de se obter águas de estudo com características semelhantes. Outrossim, mostrou a importância em se testar os mesmos valores de pH para todos os ensaios.

Com o intuito de se possibilitar um maior esclarecimento e visualização, nas quatro páginas que se seguem, estão contidas figuras (FIGURA 29 a 32) referentes aos resultados da primeira fase aludidos aos valores de pH iguais a 5,0, 5,5, 6,5 e 7,5 (valores adotados para a próxima etapa de estudo).

Afluente	D <sub>O<sub>3</sub></sub>	D <sub>FeCl<sub>3</sub></sub>	D <sub>HCl</sub>	D <sub>cal</sub>	Turbidez	
	(mg/L)	(mg/L)	(ml/L)	(mg/L)	remanescente (uT)	(% remoção)
A	0	65,0	22,2	0	3,9	95,5
B	3		16,7	0	3,9	96,7
C	6		25,0	0	21,8 (*)	82,6
D	9		13,9	0	1,2	98,5

FIGURA 29.1 – pH= 5,0 ± 0,2 [(\*) → pH= 4,5]

Afluente	D <sub>O<sub>3</sub></sub>	D <sub>FeCl<sub>3</sub></sub>	D <sub>HCl</sub>	D <sub>cal</sub>	Turbidez	
	(mg/L)	(mg/L)	(ml/L)	(mg/L)	remanescente (uT)	(% remoção)
A	0	65,0	11,1	0	21,2	75,4
B	3		8,3	0	25,0	79,0
C	6		16,7	0	4,7	96,2
D	9		5,6	0	2,4	97,0

FIGURA 29.2 – pH= 5,5 ± 0,2

Afluente	D <sub>O<sub>3</sub></sub>	D <sub>FeCl<sub>3</sub></sub>	D <sub>HCl</sub>	D <sub>cal</sub>	Turbidez	
	(mg/L)	(mg/L)	(ml/L)	(mg/L)	remanescente (uT)	(% remoção)
A	0	30,0	0	0	53,8	37,4
		45,0	0	20,0	36,6	57,4
B	3	30,0	0	0	46,3	61,1
		45,0	0	0	36,5	69,3
C	6	30,0	0	0	48,7	61,0
		45,0	0	0	27,7	77,8
D	9	30,0	0	0	24,8	69,0
		45,0	0	0	12,8	84,0

FIGURA 29.3 – pH= 6,5 ± 0,2

Afluente	D <sub>O<sub>3</sub></sub>	D <sub>FeCl<sub>3</sub></sub>	D <sub>HCl</sub>	D <sub>cal</sub>	Turbidez	
	(mg/L)	(mg/L)	(ml/L)	(mg/L)	remanescente (uT)	(% remoção)
A	0	30,0	0	120,0	25,0	70,9
B	3		0	110,0	19,3	83,8
C	6		0	30,0	34,2	72,6
D	9		0	50,0	12,8	83,5

FIGURA 29.4 – pH= 7,5 ± 0,2

FIGURA 29 – Valores de turbidez referentes à primeira etapa de ensaios, com pH= 5,0, 5,5, 6,5, 7,5 e velocidade de flotação= 12 cm/min

☞ Turbidez Afluente (A= 80,0-86,0; B= 98,0-119,0; C= 102,0-125,0; D= 76,8-80,0 (uT))



Afluente	D <sub>O<sub>3</sub></sub> (mg/L)	D <sub>FeCl<sub>3</sub></sub> (mg/L)	D <sub>HCl</sub> (ml/L)	D <sub>cal</sub> (mg/L)	Cor Aparente	
					remanescente (uPtCo)	(% remoção)
A	0	65,0	22,2	0	52,8	92,7
B	3		16,7	0	77,0	89,9
C	6		25,0	0	140,3 (*)	78,4
D	9		13,9	0	30,3	96,0

FIGURA 30.1 – pH= 5,0 ± 0,2 [(\*) ⇒ pH= 4,5]

Afluente	D <sub>O<sub>3</sub></sub> (mg/L)	D <sub>FeCl<sub>3</sub></sub> (mg/L)	D <sub>HCl</sub> (ml/L)	D <sub>cal</sub> (mg/L)	Cor Aparente	
					remanescente (uPtCo)	(% remoção)
A	0	65,0	11,1	0	136,4	81,1
B	3		8,3	0	187,0	75,5
C	6		16,7	0	38,5	94,1
D	9		5,6	0	60,5	92,1

FIGURA 30.2 – pH= 5,5 ± 0,2

Afluente	D <sub>O<sub>3</sub></sub> (mg/L)	D <sub>FeCl<sub>3</sub></sub> (mg/L)	D <sub>HCl</sub> (ml/L)	D <sub>cal</sub> (mg/L)	Cor Aparente	
					remanescente (uPtCo)	(% remoção)
A	0	30,0	0	0	478,5	33,5
		45,0	0	20,0	348,7	51,6
B	3	30,0	0	0	327,3	57,1
		45,0	0	0	349,3	54,2
C	6	30,0	0	0	315,7	51,4
		45,0	0	0	211,8	67,4
D	9	30,0	0	0	305,3	60,0
		45,0	0	0	214,5	71,9

FIGURA 30.3 – pH= 6,5 ± 0,2

Afluente	D <sub>O<sub>3</sub></sub> (mg/L)	D <sub>FeCl<sub>3</sub></sub> (mg/L)	D <sub>HCl</sub> (ml/L)	D <sub>cal</sub> (mg/L)	Cor Aparente	
					remanescente (uPtCo)	(% remoção)
A	0	30,0	0	120,0	299,0	58,4
B	3		0	110,0	181,5	76,2
C	6		0	30,0	242,0	62,8
D	9		0	50,0	209,0	72,6

FIGURA 30.4 – pH= 7,5 ± 0,2

FIGURA 30 – Valores de cor aparente referentes à primeira etapa de ensaios, com pH= 5,0, 5,5, 6,5, 7,5 e velocidade de flotação= 12 cm/min

☞ Cor Afluente (A= 710,0-720,0; B= 722,5-762,5; C= 650,0-654,0; D= 762,5-745,0 (uPtCo))

Afluente	D <sub>O<sub>3</sub></sub>	D <sub>FeCl<sub>3</sub></sub>	D <sub>HCl</sub>	D <sub>cal</sub>	DQO	
	(mg/L)	(mg/L)	(ml/L)	(mg/L)	remanescente (mg/L)	(% remoção)
A	0	65,0	22,2	0	68,2	71,5
B	3		16,7	0	65,3	77,8
C	6		25,0	0	79,9 (*)	70,6
D	9		13,9	0	36,2	85,6

FIGURA 31.1 – pH= 5,0 ± 0,2 [(\*) → pH= 4,5]

Afluente	D <sub>O<sub>3</sub></sub>	D <sub>FeCl<sub>3</sub></sub>	D <sub>HCl</sub>	D <sub>cal</sub>	DQO	
	(mg/L)	(mg/L)	(ml/L)	(mg/L)	remanescente (uPtCo)	(% remoção)
A	0	65,0	11,1	0	94,4	60,6
B	3		8,3	0	91,5	68,9
C	6		16,7	0	68,2	76,0
D	9		5,6	0	44,9	83,3

FIGURA 31.2 – pH= 5,5 ± 0,2

Afluente	D <sub>O<sub>3</sub></sub>	D <sub>FeCl<sub>3</sub></sub>	D <sub>HCl</sub>	D <sub>cal</sub>	DQO	
	(mg/L)	(mg/L)	(ml/L)	(mg/L)	remanescente (uPtCo)	(% remoção)
A	0	30,0	0	0	155,5	35,1
		45,0	0	20,0	129,4	46,0
B	3	30,0	0	0	114,8	61,0
		45,0	0	0	91,5	68,9
C	6	30,0	0	0	123,5	54,6
		45,0	0	0	106,0	61,0
D	9	30,0	0	0	111,9	55,4
		45,0	0	0	62,4	75,2

FIGURA 31.3 – pH= 6,5 ± 0,2

Afluente	D <sub>O<sub>3</sub></sub>	D <sub>FeCl<sub>3</sub></sub>	D <sub>HCl</sub>	D <sub>cal</sub>	DQO	
	(mg/L)	(mg/L)	(ml/L)	(mg/L)	remanescente (uPtCo)	(% remoção)
A	0	30,0	0	120,0	111,9	53,3
B	3		0	110,0	62,4	78,8
C	6		0	30,0	114,8	57,8
D	9		0	50,0	88,6	64,7

FIGURA 31.4 – pH= 7,5 ± 0,2

FIGURA 31 – Valores de DQO referentes à primeira etapa de ensaios, com pH= 5,0, 5,5, 6,5, 7,5 e velocidade de flotação= 12 cm/min

☞ DQO Afluente (A= 239,4; B= 294,0; C= 272,0; D= 251,0 (mg/L))



Afluente	D <sub>O<sub>3</sub></sub>	D <sub>FeCl<sub>3</sub></sub>	D <sub>HCl</sub>	D <sub>cal</sub>	P total	
	(mg/L)	(mg/L)	(ml/L)	(mg/L)	remanescente (uPtCo)	(% remoção)
A	0	65,0	22,2	0	2,6	87,4
B	3		16,7	0	3,0	86,3
C	6		25,0	0	8,1 (*)	60,5
D	9		13,9	0	0,0	100,0

FIGURA 32.1 – pH= 5,0 ± 0,2 [(\*) → pH= 4,5]

Afluente	D <sub>O<sub>3</sub></sub>	D <sub>FeCl<sub>3</sub></sub>	D <sub>HCl</sub>	D <sub>cal</sub>	P total	
	(mg/L)	(mg/L)	(ml/L)	(mg/L)	remanescente (uPtCo)	(% remoção)
A	0	65,0	11,1	0	6,6	68,0
B	3		8,3	0	4,5	79,5
C	6		16,7	0	2,2	87,2
D	9		5,6	0	0,3	97,1

FIGURA 32.2 – pH= 5,5 ± 0,2

Afluente	D <sub>O<sub>3</sub></sub>	D <sub>FeCl<sub>3</sub></sub>	D <sub>HCl</sub>	D <sub>cal</sub>	P total	
	(mg/L)	(mg/L)	(ml/L)	(mg/L)	remanescente (uPtCo)	(% remoção)
A	0	30,0	0	0	14,3	30,6
		45,0	0	20,0	8,9	56,8
B	3	30,0	0	0	12,9	41,1
		45,0	0	0	12,8	41,6
C	6	30,0	0	0	12,7	38,6
		45,0	0	0	8,6	58,4
D	9	30,0	0	0	8,0	4,3
		45,0	0	0	47,2	71,8

FIGURA 32.3 – pH= 6,5 ± 0,2

Afluente	D <sub>O<sub>3</sub></sub>	D <sub>FeCl<sub>3</sub></sub>	D <sub>HCl</sub>	D <sub>cal</sub>	P total	
	(mg/L)	(mg/L)	(ml/L)	(mg/L)	remanescente (uPtCo)	(% remoção)
A	0	30,0	0	120,0	9,1	55,8
B	3		0	110,0	11,8	46,1
C	6		0	30,0	12,5	39,1
D	9		0	50,0	5,2	66,0

FIGURA 32.4 – pH= 7,5 ± 0,2

FIGURA 32 – Valores de P total referentes à primeira etapa de ensaios, com pH= 5,0, 5,5, 6,5, 7,5 e velocidade de flotação= 12 cm/min

☞ P total Afluente (A= 20,6; B= 21,9; C= 20,6; D= 15,2 (mg/L))

Observando-se as figuras (FIGURA 29 à FIGURA 32), sugere-se que sejam analisadas, separando-as por tipo de afluente e por parâmetro:

### ① TURBIDEZ

#### Afluente A ( $D_{O_3}$ = 0 mg/L)

Melhor remoção: 95,5 %;  $pH = 5,0 \pm 0,2$ ;  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L.

#### Afluente B ( $D_{O_3}$ = 3 mg/L)

Melhor remoção: 96,7 %;  $pH = 5,0 \pm 0,2$ ;  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L.

#### Afluente C ( $D_{O_3}$ = 6 mg/L)

Melhor remoção: 96,2 %;  $pH = 5,5 \pm 0,2$ ;  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L.

#### Afluente D ( $D_{O_3}$ = 9 mg/L)

Melhores remoções: 98,5 %;  $pH = 5,0 \pm 0,2$ ;  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L.  
97,0 %;  $pH = 5,5 \pm 0,2$ ;  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L.

### ② COR APARENTE

#### Afluente A ( $D_{O_3}$ = 0 mg/L)

Melhor remoção: 92,7 %;  $pH = 5,0 \pm 0,2$ ;  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L.

#### Afluente B ( $D_{O_3}$ = 3 mg/L)

Melhor remoção: 89,9 %;  $pH = 5,0 \pm 0,2$ ;  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L.

#### Afluente C ( $D_{O_3}$ = 6 mg/L)

Melhor remoção: 94,1 %;  $pH = 5,5 \pm 0,2$ ;  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L.

#### Afluente D ( $D_{O_3}$ = 9 mg/L)

Melhor remoção: 96,0 %;  $pH = 5,0 \pm 0,2$ ;  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L.

### ③ DQO

#### Afluente A ( $D_{O_3}$ = 0 mg/L)

Melhor remoção: 71,5 %;  $pH = 5,0 \pm 0,2$ ;  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L.

#### Afluente B ( $D_{O_3}$ = 3 mg/L)

Melhores remoções: 77,8 %;  $pH = 5,0 \pm 0,2$ ;  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L.  
78,8 %;  $pH = 7,5 \pm 0,2$ ;  $D_{FeCl_3} = 30$  mg/L.

#### Afluente C ( $D_{O_3}$ = 6 mg/L)

Melhor remoção: 76,0 %;  $pH = 5,5 \pm 0,2$ ;  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L.

#### Afluente D ( $D_{O_3}$ = 9 mg/L)

Melhores remoções: 85,6 %;  $pH = 5,0 \pm 0,2$ ;  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L.  
83,3 %;  $pH = 5,5 \pm 0,2$ ;  $D_{FeCl_3} = 65$  mg/L.



#### ④ P TOTAL

##### Afluente A ( $D_{O_3}$ = 0 mg/L)

*Melhor remoção: 87,4 %; pH= 5,0 ± 0,2;  $D_{FeCl_3}$ = 65 mg/L.*

##### Afluente B ( $D_{O_3}$ = 3 mg/L)

*Melhor remoção: 86,3 %; pH= 5,0 ± 0,2;  $D_{FeCl_3}$ = 65 mg/L.*

##### Afluente C ( $D_{O_3}$ = 6 mg/L)

*Melhor remoção: 87,2 %; pH= 5,5 ± 0,2;  $D_{FeCl_3}$ = 65 mg/L.*

##### Afluente D ( $D_{O_3}$ = 9 mg/L)

*Melhores remoções: 100,0 %; pH= 5,0 ± 0,2;  $D_{FeCl_3}$ = 65 mg/L.  
97,1 %; pH= 5,5 ± 0,2;  $D_{FeCl_3}$ = 65 mg/L.*

O que se pode dizer desta análise, é que as melhores remoções de todos os parâmetros investigados encontram-se, em sua grande maioria, nas faixas de pH entre 5,0 e 5,5, com dosagem de coagulante igual a 65 mg/L e dosagem de ozônio entre 6 e 9 mg/L, com tendência à maior delas.

Porém, ainda não se tem como prever o que ocorre com outras combinações do tipo: pH= 7,5 e  $D_{FeCl_3}$ = 65 mg/L, por exemplo. Portanto, apenas de posse dos resultados das etapas subseqüentes de estudos é que se poderá chegar a idéias mais esclarecedoras e definitivas, a respeito das influências do ozônio antecedendo a flotação para o tipo de água em questão.

É importante mencionar que, no que tange aos parâmetros relativos a ferro e manganês, observa-se, através da FIGURA 12, que a presença de ferro na água de estudo (efluente do reator) é relativamente baixa, variando entre 0,39 e 1,62 mg/L. Porém, verifica-se que os valores obtidos das amostras submetidas aos ensaios de ozonização, coagulação e flotação apresentam-se, em sua maioria, bem maiores que aqueles determinados para o afluente do sistema. Tal fato se deve, obviamente, aos residuais deixados na água pelo coagulante empregado, o cloreto férrico. Dessa forma, não faz sentido analisar tais valores. No caso do manganês, uma vez que a água de estudo praticamente não contém concentração deste metal, não há razão para se continuar a verificação de sua remoção.

#### 5.4. Resultados dos ensaios referentes à segunda etapa de estudo

Na figura que se segue (FIGURA 33), apresentam-se os valores resultantes das determinações e análises físico-químicas características das amostras pré-ozonizadas e flotadas, em acordo com metodologia traçada no Capítulo 4, referentes aos ensaios realizados na segunda fase do presente estudo. Novamente, serão mostrados apenas os resultados relacionados à velocidade de flotação de 12 cm/min. Os dados restantes encontram-se, em sua forma completa, no ANEXO 2.

Dando-se seqüência à apresentação dos resultados, após a FIGURA 33, são expostos gráficos relativos às curvas de flotação para cada dosagem de cloreto férrico aplicada e respectiva dosagem de ozônio.



Água	V	D <sub>FeCl3</sub>	D <sub>O3</sub>	D <sub>HCl1%</sub>	D <sub>Cal</sub>	pH	Turbidez		Cor Aparente		DQO		P total		Alcalinidade mg/L CaCO <sub>3</sub>
	cm/min	mg/L	mg/L	ml/L	mg/L		uT	% R	uPtCo	% R	mg/L	% R	mg/L	% R	
T i p o A	12	30	3	27,8	0,0	5,2	2,1	93,9	60,5	70,5	39,1	54,0	6,0	51,3	31,6
				25,0	0,0	5,5	6,2	82,2	49,5	75,9	42,0	50,6	6,0	51,5	45,5
				0,0	0,0	6,7	5,0	85,6	71,5	65,1	44,9	47,2	6,5	46,6	166,7
				0,0	100,0	7,7	3,0	91,5	63,3	69,2	39,1	54,0	6,9	43,8	189,6
			6	28,9	0,0	5,1	1,3	96,2	30,3	85,2	42,0	50,6	6,0	50,8	29,7
				25,0	0,0	5,4	1,8	94,9	38,5	81,2	47,8	43,8	6,0	50,8	44,6
				0,0	0,0	6,7	2,8	91,9	55,0	73,2	50,7	40,3	7,2	41,7	148,5
				0,0	90,0	7,7	2,0	94,3	49,5	75,9	33,2	60,9	7,7	36,9	178,2
			9	29,4	0,0	5,1	1,0	97,1	30,3	85,2	33,2	60,9	5,9	51,9	29,7
				25,0	0,0	5,5	1,7	95,0	44,0	78,5	50,7	40,3	6,7	45,6	44,6
				0,0	0,0	6,7	2,3	93,3	55,0	73,2	47,8	43,8	7,3	40,3	163,4
				0,0	50,0	7,5	2,0	94,4	49,5	75,9	50,7	40,3	7,1	42,2	178,2
T i p o B	12	45	3	22,2	0,0	5,1	2,4	97,8	49,5	86,3	36,3	71,6	1,3	87,1	15,2
				19,4	0,0	5,4	3,8	96,4	60,5	83,2	50,9	60,3	2,0	79,2	30,3
				0,0	0,0	6,6	37,8	64,0	163,9	54,5	80,0	37,5	4,2	56,6	123,8
				0,0	95,0	7,7	16,8	84,0	123,2	65,8	80,0	37,5	4,3	56,1	148,5
			6	23,3	0,0	4,8	1,7	98,4	26,4	92,7	48,0	62,5	0,8	92,4	9,9
				19,4	0,0	5,4	3,3	96,9	33,0	90,8	65,4	48,9	1,8	82,0	24,8
				0,0	0,0	6,7	27,1	74,2	128,7	64,3	74,2	42,1	4,1	58,3	104,0
				0,0	75,0	7,5	14,6	86,1	78,1	78,3	71,3	44,3	3,8	60,9	133,7
			9	22,2	0,0	4,9	2,2	97,9	26,4	92,7	53,8	58,0	1,2	87,4	14,9
				19,4	0,0	5,4	1,6	98,5	29,7	91,8	59,6	53,4	2,5	73,9	37,1
				0,0	0,0	6,7	25,0	76,2	94,6	73,7	74,2	42,1	4,0	59,4	126,2
				0,0	56,0	7,4	18,8	82,1	78,1	78,3	71,3	44,3	4,0	59,1	163,4
T i p o C	12	65	3	23,3	0,0	5,2	2,4	93,1	66,0	83,1	45,1	76,0	2,3	78,5	45,5
				19,4	0,0	5,6	3,9	88,8	78,1	80,0	45,1	76,0	2,4	76,8	44,6
				0,0	0,0	6,6	14,9	57,6	150,7	61,4	50,9	72,9	2,7	74,2	163,4
				0,0	95,0	7,4	5,7	83,6	148,5	61,9	48,0	74,5	3,1	70,6	193,1
			6	27,8	0,0	4,9	2,1	94,1	38,5	90,1	21,8	88,4	1,4	86,6	23,8
				25,0	0,0	5,4	1,3	96,3	34,1	91,3	33,4	82,2	1,4	86,8	39,6
				0,0	0,0	6,5	18,3	47,8	146,3	62,5	56,7	69,8	2,8	73,0	155,9
				0,0	80,0	7,4	5,1	85,4	122,1	68,7	48,0	74,5	2,8	73,5	178,2
			9	27,8	0,0	4,9	0,9	97,5	24,2	93,8	30,5	83,8	1,2	88,6	7,4
				25,6	0,0	5,4	1,1	97,0	26,4	93,2	39,2	79,1	1,6	85,0	33,4
				0,0	0,0	6,5	20,2	42,2	116,6	70,1	53,8	71,4	2,8	73,1	155,9
				0,0	82,0	7,5	12,2	65,1	96,8	75,2	36,3	80,7	2,9	72,0	183,2
T i p o D	12	30	0	47,0	0,0	5,1	22,7	62,2	179,3	61,0	74,2	59,2	5,8	44,5	34,7
				40,0	0,0	5,5	32,5	45,9	211,2	54,1	65,4	64,0	6,3	40,1	58,8
				0,0	0,0	6,5	27,0	55,1	293,7	36,2	82,9	54,4	5,9	43,8	155,9
				0,0	100,0	7,4	15,2	74,7	237,6	48,3	65,4	64,0	6,0	43,2	200,5
		45	50,0	0,0	4,9	1,6	97,3	37,4	91,9	50,9	72,0	3,3	68,8	26,7	
			45,0	0,0	5,4	7,6	87,4	163,9	64,4	53,8	70,4	4,2	59,9	33,4	
			0,0	0,0	6,4	24,4	59,3	262,9	42,8	82,9	54,4	5,4	48,2	142,6	
			0,0	105,0	7,3	21,6	64,1	233,2	49,3	77,1	57,6	4,2	59,7	193,1	
		65	45,0	0,0	5,0	2,9	95,2	64,9	85,9	50,9	72,0	2,1	80,0	22,3	
			37,0	0,0	5,4	4,4	92,7	81,4	82,3	59,6	67,2	2,2	78,7	37,1	
			0,0	0,0	6,4	27,3	54,5	222,2	51,7	68,4	62,4	3,2	69,1	133,7	
			0,0	121,0	7,4	23,1	61,5	217,8	52,7	71,3	60,8	3,0	71,5	181,9	

(\*) V= 10 cm/min

FIGURA 33 – Resultados referentes à segunda etapa de ensaios para velocidade de flotação = 12 cm/min

⇒ Água:

Tipo A: pH= 6,8; Turb.= 35,0-45,0 uT; Cor= 205,0-210,0 uPtCo; DQO= 85,0 mg/L; Ptot= 12,3 mg/L; Alcalin.= 207,9 mg/L CaCO<sub>3</sub>

Tipo B: pH= 6,7; Turb.= 105,0-110,0 uT; Cor= 360,0-370,0 uPtCo; DQO= 128,0 mg/L; Ptot= 9,8 mg/L; Alcalin.= 178,2 mg/L CaCO<sub>3</sub>

Tipo C: pH= 6,7; Turb.= 35,5-40,0 uT; Cor= 390,0-398,0 uPtCo; DQO= 188,0 mg/L; Ptot= 10,5 mg/L; Alcalin.= 222,8 mg/L CaCO<sub>3</sub>

Tipo D: pH= 6,7; Turb.= 55,5-70,0 uT; Cor= 460,0-480,0 uPtCo; DQO= 182,0 mg/L; Ptot= 10,5 mg/L; Alcalin.= 185,6 mg/L CaCO<sub>3</sub>

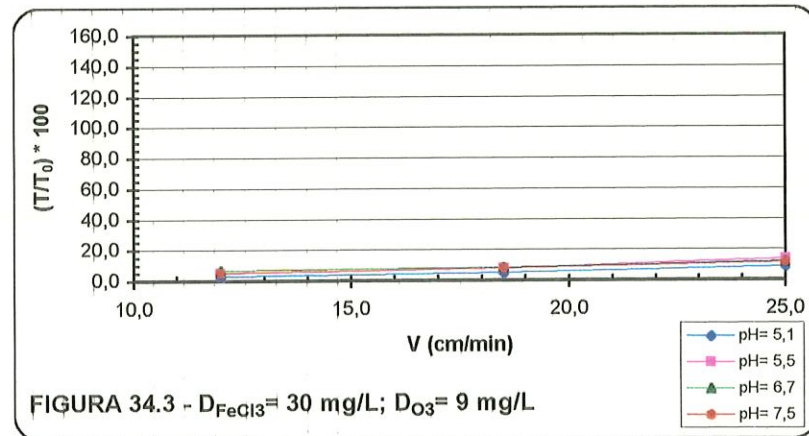
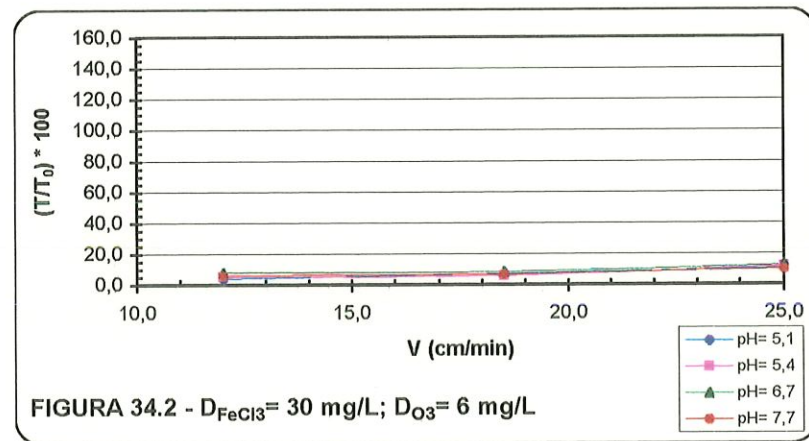
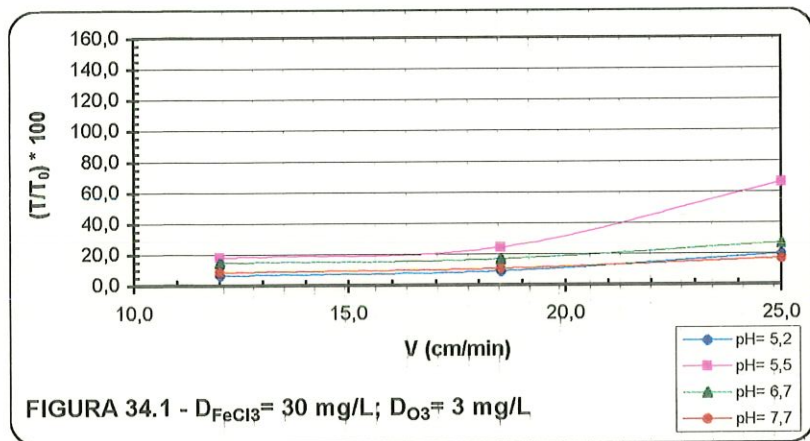


FIGURA 34 - Curvas de flotação para turbidez referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 30 mg/L (Água Tipo A:  $T_0 = 35,0 - 45,0 \text{ uT}$ )



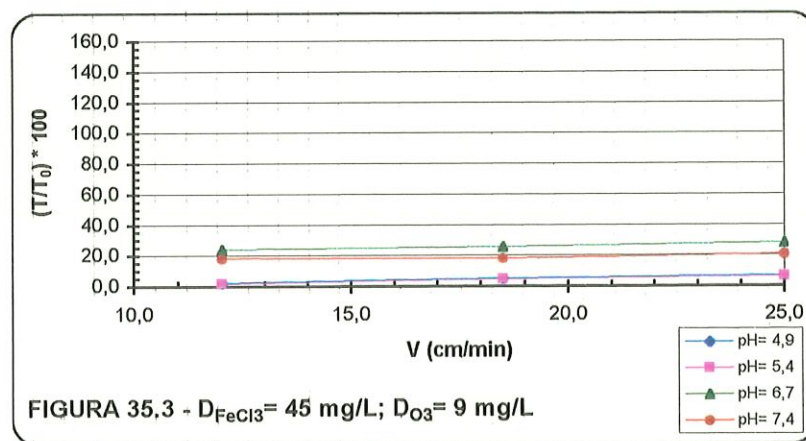
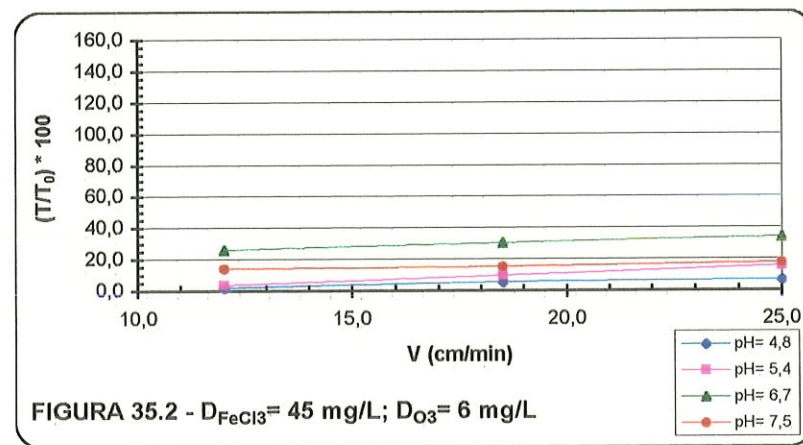
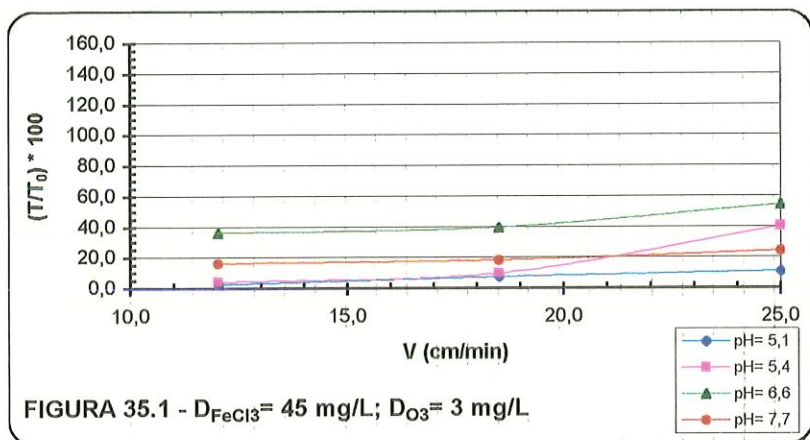


FIGURA 35 - Curvas de flotação para turbidez referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 45 mg/L (Água Tipo B:  $T_0 = 105,0 - 110,0 \text{ uT}$ )

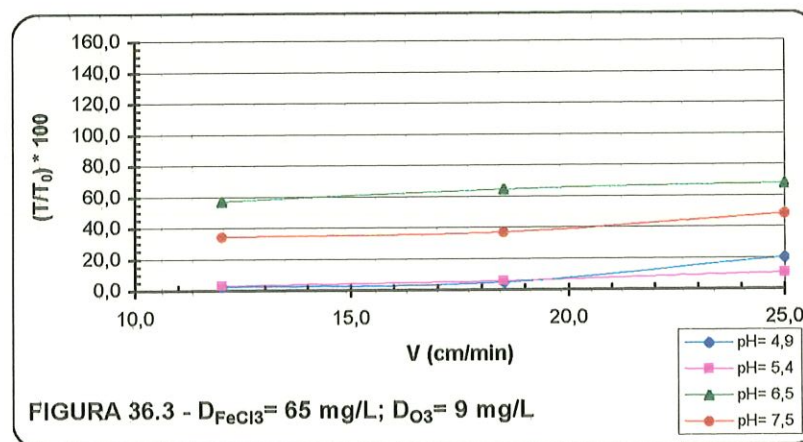
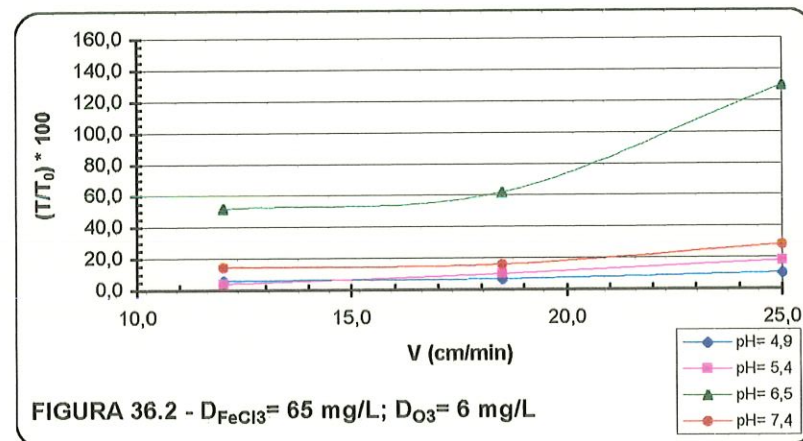
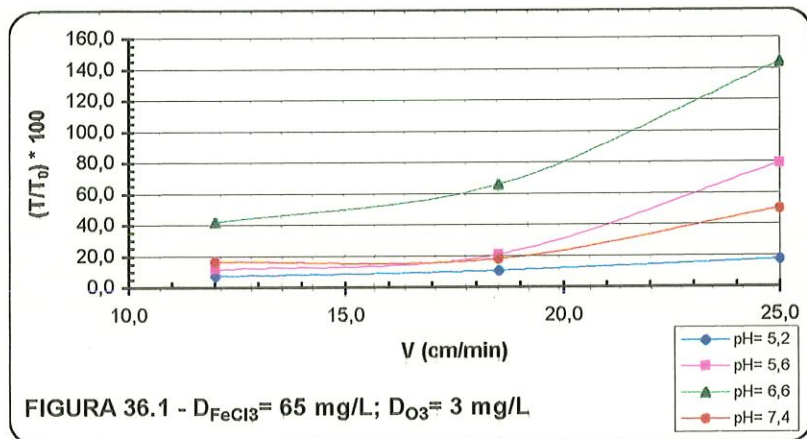


FIGURA 36 - Curvas de flotação para turbidez referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 65 mg/L (Água Tipo C:  $T_0 = 35,5 - 40,0 \text{ uT}$ )



Observando-se as curvas de flotação para turbidez, referentes à segunda etapa de ensaios, apresentadas na FIGURA 34 ( $D_{\text{FeCl}_3} = 30 \text{ mg/L}$ ) verifica-se que, para  $D_{\text{O}_3} = 3 \text{ mg/L}$  (FIGURA 34.1), os melhores valores de eficiência de remoção de turbidez são aqueles em que o pH é igual a 5,2 e 7,7, denotando pouca diferença entre seus valores (da ordem de 3 %) ( $R \cong 93 \%$  para  $V = 12 \text{ cm/min}$  e  $\text{pH} = 5,2$ ). Verifica-se que, entre os valores de velocidade de flotação compreendidos na faixa de 12 a 18,5 cm/min, as curvas relativas a todos os valores de pH estudados permanecem constantes, com mínimas inclinações. Por sua vez, quando  $D_{\text{O}_3} = 6 \text{ mg/L}$  (FIGURA 34.2) pode-se averiguar que todas as curvas praticamente coincidem, mostrando diferenças insignificantes entre os valores de eficiência de remoção turbidez para todo o intervalo de velocidade de flotação estudado ( $R \cong 95 \%$ , para  $V = 12 \text{ cm/min}$ ). De acordo com a FIGURA 34.3, em que  $D_{\text{O}_3} = 9 \text{ mg/L}$ , constata-se que o caráter coincidente das curvas se mantém, sendo que a curva referente ao  $\text{pH} = 5,1$  demonstra ligeira melhora em seus valores para todas as velocidades ( $R \cong 97 \%$  para  $V = 12 \text{ cm/min}$ ).

Investigando-se as curvas de flotação expostas na FIGURA 35 ( $D_{\text{FeCl}_3} = 45 \text{ mg/L}$ ), pode observar que, para  $D_{\text{O}_3} = 3 \text{ mg/L}$  (FIGURA 35.1) os melhores valores de remoção de turbidez são aqueles relacionados ao pH de 5,1 e 5,4, para velocidade de flotação entre 12 e 18,5 cm/min e, apenas  $\text{pH} = 5,1$  para velocidade entre 18,5 a 25 cm/min ( $R \cong 97 \%$  para  $V = 12 \text{ cm/min}$ ). Conforme se verifica na FIGURA 35.2 ( $D_{\text{O}_3} = 6 \text{ mg/L}$ ), os valores de pH entre 4,8 e 5,4 oferecem os melhores resultados de remoção de turbidez para  $V = 12 \text{ cm/min}$  ( $R \cong 98 \%$ ), com suave piora, a partir de  $V = 15 \text{ cm/min}$  para a curva referente ao pH igual a 5,4. Em se observando a FIGURA 35.3, quando  $D_{\text{O}_3} = 9 \text{ mg/L}$ , pode-se notar que as curvas relativas aos valores de pH de 4,9 e 5,4 são exatamente as mesmas, em toda a faixa de velocidades investigada ( $R \cong 99 \%$  para  $V = 12 \text{ cm/min}$ ).

Em acordo com as curvas de flotação para turbidez, ilustradas na FIGURA 36 ( $D_{\text{FeCl}_3} = 65 \text{ mg/L}$ ), pode-se constatar que, quando  $D_{\text{O}_3} = 3 \text{ mg/L}$  (FIGURA 36.1) a característica de reta das curvas não se evidencia para a

maioria das velocidades, conforme verificado na FIGURA 35.1 e na FIGURA 34.1. As melhores remoções são aquelas correspondentes ao valor de pH igual a 5,2 (curva mais uniforme), com  $R \cong 93\%$  para  $V = 12$  cm/min. Consoante observado na FIGURA 36.2, na qual  $D_{O_3} = 6$  mg/L, a curva de flotação referente ao valor de pH de 6,5 mostra-se bem afastada das demais curvas, apresentando os piores valores de remoção. Os melhores resultados obtidos com velocidades de flotação entre 12 e 18,5 cm/min são concernentes aos valores de pH de 4,9 e 5,4 ( $R \cong 95\%$  para  $V = 12$  cm/min), sendo que a curva relativa ao pH de 4,9 denota ser a mais próxima do eixo das velocidades, para  $V = 25$  cm/min. Averiguando-se a FIGURA 36.3, em que  $D_{O_3} = 9$  mg/L, observa-se que os resultados mais atraentes são aqueles incluídos entre valores de pH de 4,9 e 5,4, para  $V = 12$  a 18,5 cm/min ( $R \cong 97\%$  e  $V = 12$  cm/min). Por outro lado, para valores de  $V = 18,5$  a 25 cm/min, a curva referente ao pH de 5,4 é mais satisfatória em termos de eficiência de remoção de turbidez.

Dessa forma, examinando-se as curvas de flotação para turbidez relativas à segunda fase de estudos, nota-se que, com relação ao pH as melhores remoções encontram-se na faixa de 5,0 a 5,5. No que tange à dosagem de ozônio, nota-se que há melhora nos resultados correspondentes às dosagens de 6 e 9 mg/L, não havendo diferenças marcantes entre elas.

Constata-se ainda que, quando não se está dentro das condições ótimas de flotação para a referida água de estudo (pH  $\cong$  6,5 e 7,5), ao se aumentar a dosagem de cloreto férrico, o desempenho da pré-ozonização sobre a flotação piora, quando a dosagem de ozônio aplicada é a máxima (vide FIGURA 36).

A seguir, são expostas as curvas de flotação relativas à cor aparente (FIGURA 37 à FIGURA 39).



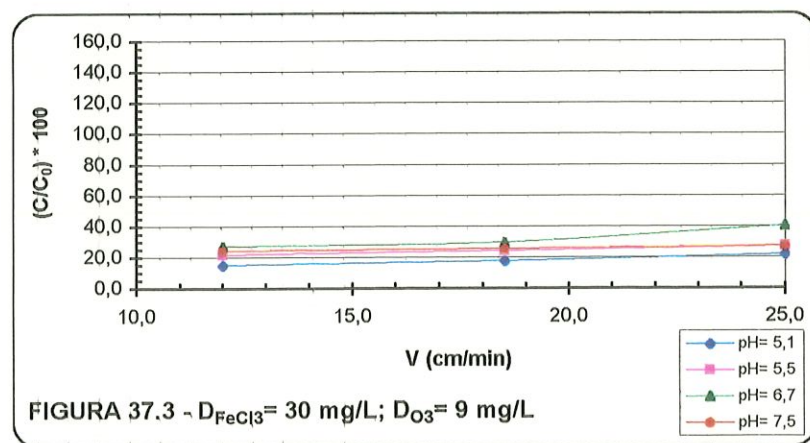
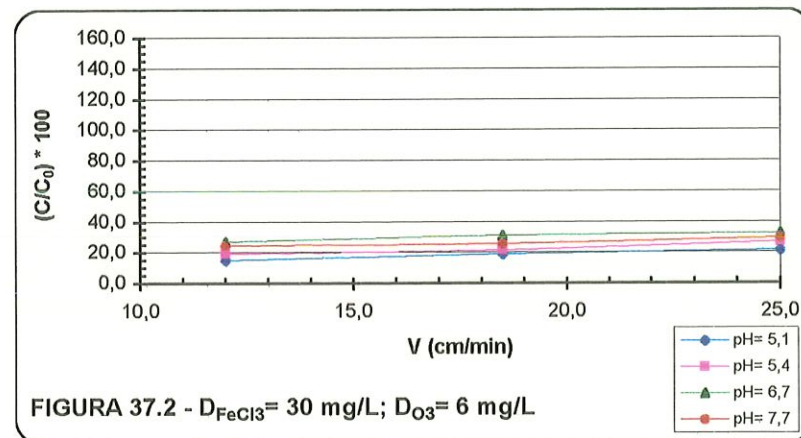
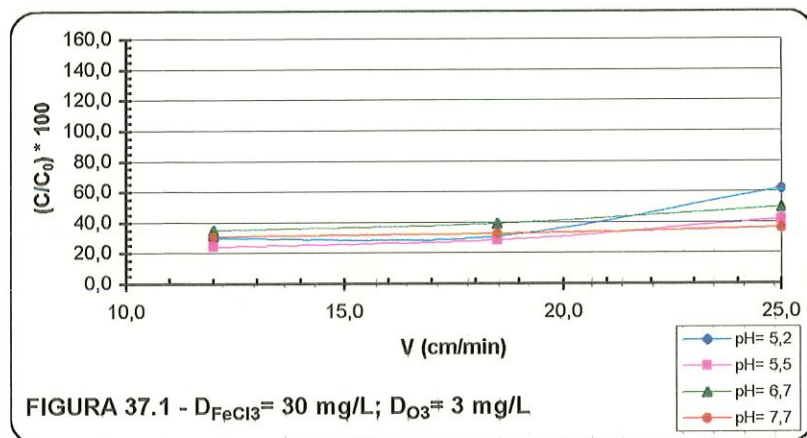


FIGURA 37 - Curvas de flotação para cor aparente referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 30 mg/L  
(Água Tipo A:  $C_0 = 205,0 - 210,0 \text{ uPtCo}$ )

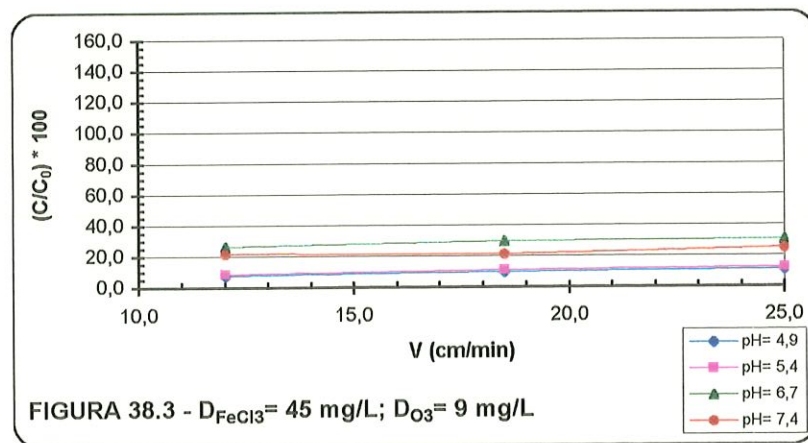
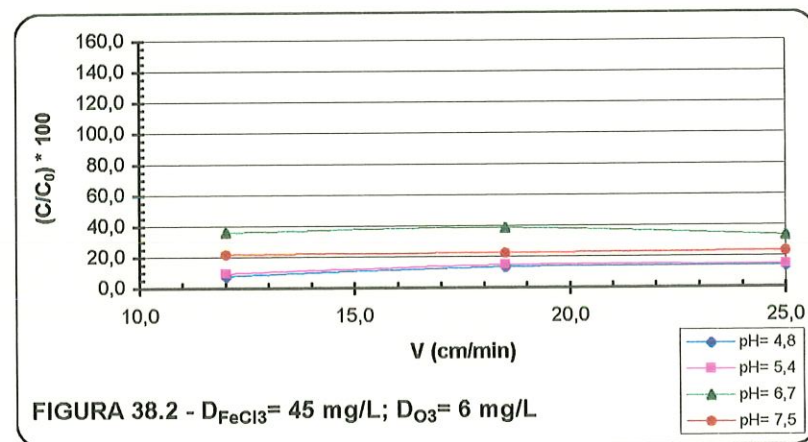
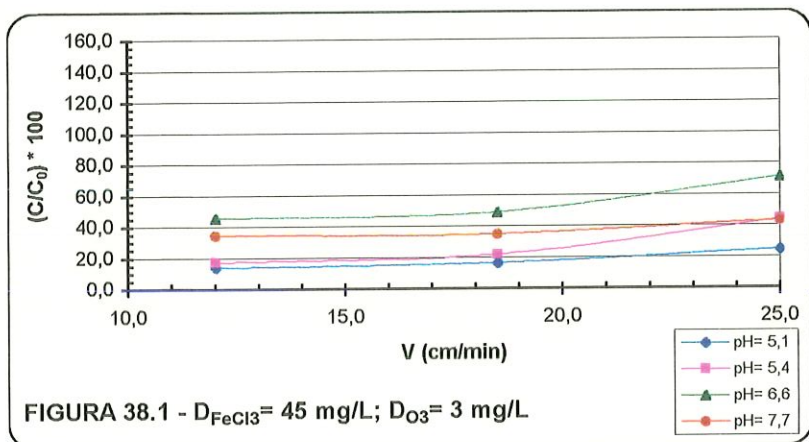


FIGURA 38 - Curvas de flotação para cor aparente referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 45 mg/L  
(Água Tipo B:  $C_0 = 360,0 - 370,0 \text{ uPtCo}$ )



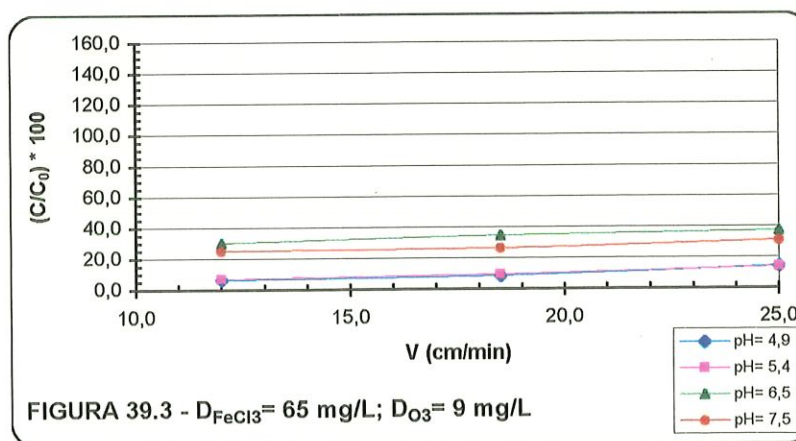
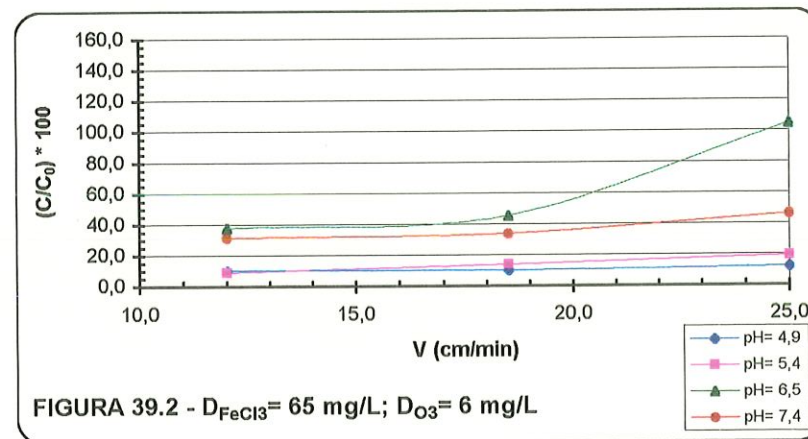
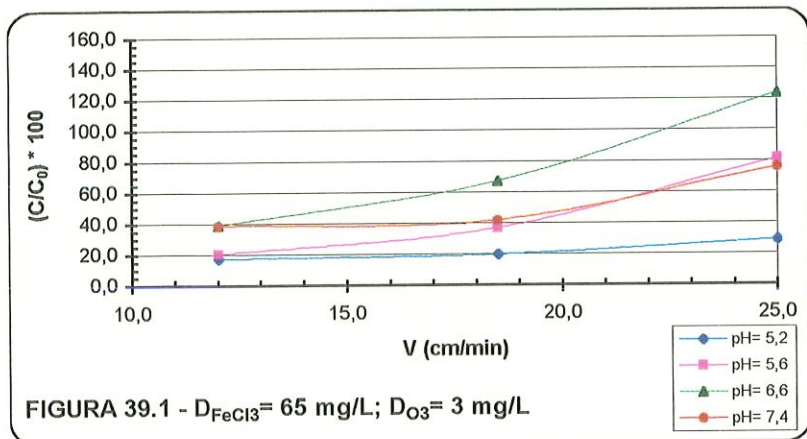


FIGURA 39 - Curvas de flotação para cor aparente referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 65 mg/L (Água Tipo C:  $C_0 = 390,0 - 398,0 \text{ uPtCo}$ )

Ao serem verificadas as curvas de flotação para cor aparente, referentes ao segundo estágio de ensaios, apresentadas na FIGURA 37 ( $D_{\text{FeCl}_3} = 30 \text{ mg/L}$ ) observa-se que, para  $D_{\text{O}_3} = 3 \text{ mg/L}$  (FIGURA 37.1), os melhores valores de eficiência de remoção de cor aparente são aqueles em que o pH é igual a 5,5 ( $R \cong 75 \%$  para  $V = 12 \text{ cm/min}$  e  $\text{pH} = 5,5$ ). Verifica-se que, entre os valores de velocidade de flotação compreendidos na faixa de 12 a 18,5 cm/min, as curvas relativas a todos os valores de pH estudados permanecem constantes, com suaves inclinações, sendo que a diferença entre os valores de remoção de cor aparente para este intervalo de velocidades é reduzido (da ordem de 10 %) para as curvas referentes aos valores de pH de 5,2, 5,5 e 7,7. Quando  $D_{\text{O}_3} = 6 \text{ mg/L}$  (FIGURA 37.2) pode-se averiguar que todas as melhores eficiências de remoção de cor aparente encontram-se sob pH de 5,1 para todas as velocidades estudadas, sendo que, para  $V = 18,5 \text{ cm/min}$ , as curvas relativas ao pH de 5,1 e 5,4 praticamente coincidem, mostrando diferenças pouco significativas entre seus valores, ao longo de todo o intervalo de velocidade de flotação estudado ( $R \cong 85 \%$ , para  $\text{pH} = 5,1$  e  $V = 12 \text{ cm/min}$ ). Por sua vez, quando  $D_{\text{O}_3} = 9 \text{ mg/L}$  (FIGURA 37.3) constata-se que o caráter coincidente das curvas se mantém, sendo que a curva referente ao  $\text{pH} = 5,1$  demonstra ligeira melhora em seus valores para todas as velocidades ( $R \cong 85 \%$  para  $V = 12 \text{ cm/min}$ ).

Investigando-se as curvas de flotação expostas na FIGURA 38 ( $D_{\text{FeCl}_3} = 45 \text{ mg/L}$ ), pode observar que, para  $D_{\text{O}_3} = 3 \text{ mg/L}$  (FIGURA 38.1) os melhores valores de remoção de cor aparente são aqueles relacionados ao pH de 5,1 e 5,4, com poucas diferenças entre eles (da ordem de 5%) para velocidade de flotação entre 12 e 18,5 cm/min e, apenas  $\text{pH} = 5,1$  para velocidade entre 18,5 a 25 cm/min ( $R \cong 86 \%$  para  $\text{pH} = 5,1$  e  $V = 12 \text{ cm/min}$ ). Conforme se verifica na FIGURA 38.2 ( $D_{\text{O}_3} = 6 \text{ mg/L}$ ), os valores de pH entre 4,8 e 5,4 oferecem os melhores resultados de remoção de cor aparente para todas as velocidades consideradas ( $R \cong 92 \%$  para  $V = 12 \text{ cm/min}$ ). Em se observando a FIGURA 38.3, quando  $D_{\text{O}_3} = 9 \text{ mg/L}$ , pode-se notar que as curvas relativas



aos valores de pH de 4,9 e 5,4 continuam se coincidindo em toda a faixa de velocidades investigada ( $R \cong 93\%$  para  $V = 12$  cm/min).

Baseando-se nas curvas de flotação para cor aparente, ilustradas na FIGURA 39 ( $D_{\text{FeCl}_3} = 65$  mg/L), pode-se constatar que, quando  $D_{\text{O}_3} = 3$  mg/L (FIGURA 39.1) a característica de reta das curvas não mais se evidencia para a maioria das velocidades, conforme verificado na FIGURA 36.1. As melhores remoções são aquelas correspondentes ao valor de pH igual a 5,2 (curva mais uniforme), com  $R \cong 83\%$  para  $V = 12$  cm/min. Pode-se observar que na FIGURA 39.2, em que  $D_{\text{O}_3} = 6$  mg/L, a curva de flotação referente aos valores de pH de 4,9 e 5,4 ( $R \cong 90\%$  para  $V = 12$  cm/min), proporcionam os melhores resultados, com reduzidas diferenças entre eles quando a velocidade de flotação se encontra no intervalo entre 18,5 e 25 cm/min, piorando para pH igual a 5,4. Observando-se a FIGURA 39.3, em que  $D_{\text{O}_3} = 9$  mg/L, averigua-se que os resultados mais atraentes são aqueles incluídos entre valores de pH de 4,9 e 5,4, para todas as velocidades estudadas ( $R \cong 94\%$  e  $V = 12$  cm/min) para ambos os valores de pH.

Assim, pode-se notar que, para o parâmetro referente à cor aparente, as melhores remoções, relacionadas à segunda fase do presente estudo, encontram-se, conforme observado para a turbidez, na faixa de pH entre 5,0 e 5,5.

Observa-se que, para as dosagens de coagulante igual a 45 e 65 mg/L e dosagens de ozônio de 6 e 9 mg/L, as remoções, relativas a todas as velocidades de flotação, nas condições de pH mencionadas, apresentam pouca diferença entre seus valores (vide FIGURA 38 e FIGURA 39).

São apresentadas a seguir, as curvas concernentes à remoção de DQO (FIGURA 40 a FIGURA 42).

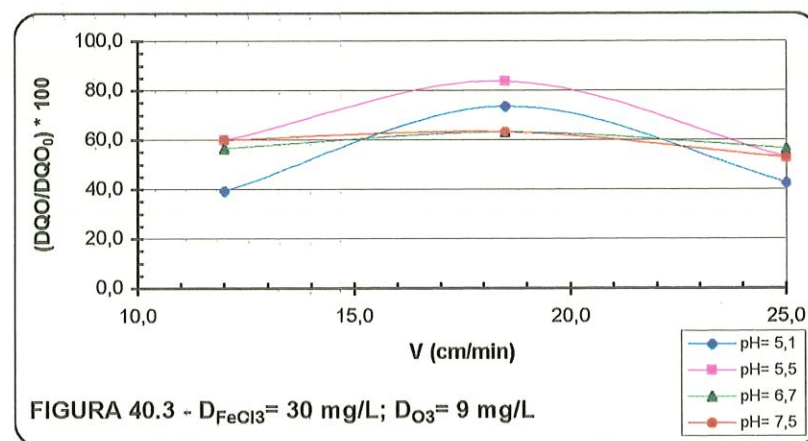
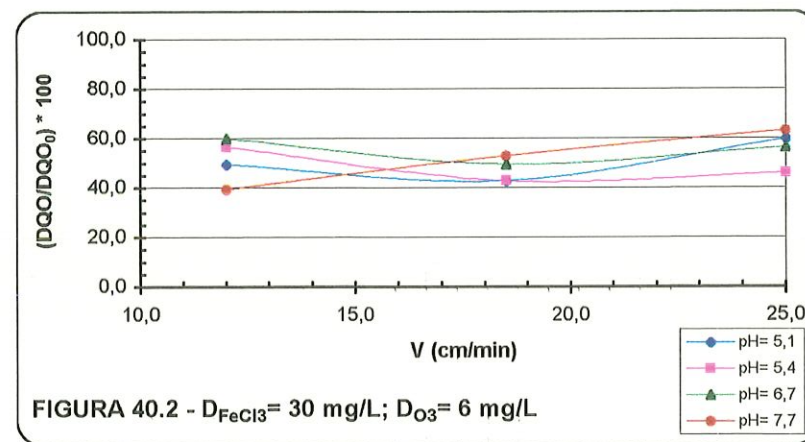
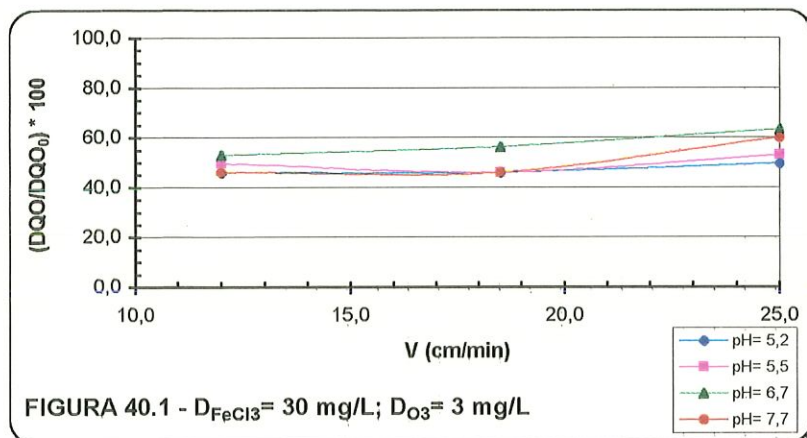


FIGURA 40 - Curvas de flotação para DQO referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 30 mg/L (Água Tipo A:  $DQO_0 = 85,0 \text{ mg/L}$ )



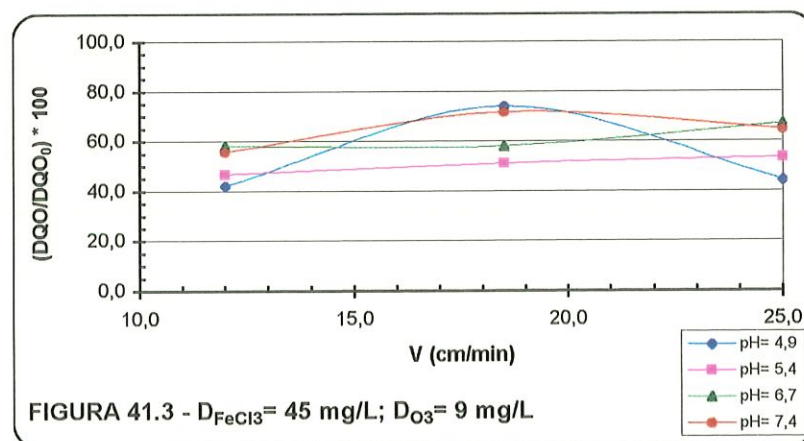
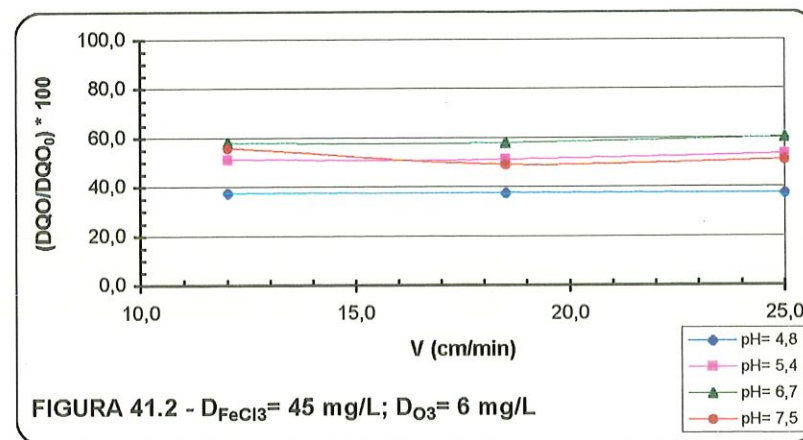
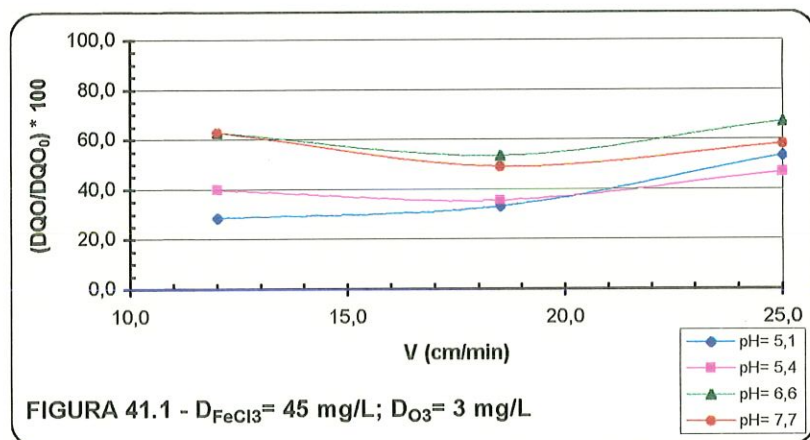


FIGURA 41 - Curvas de flotação para DQO referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 45 mg/L (Água Tipo B:  $DQO_0 = 128,0 \text{ mg/L}$ )

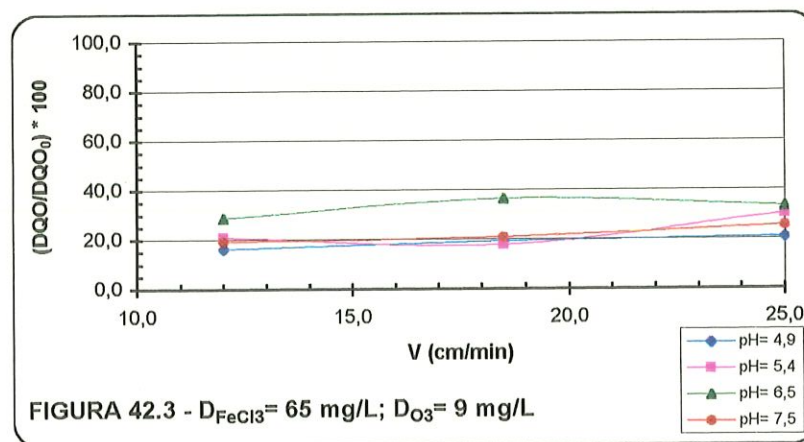
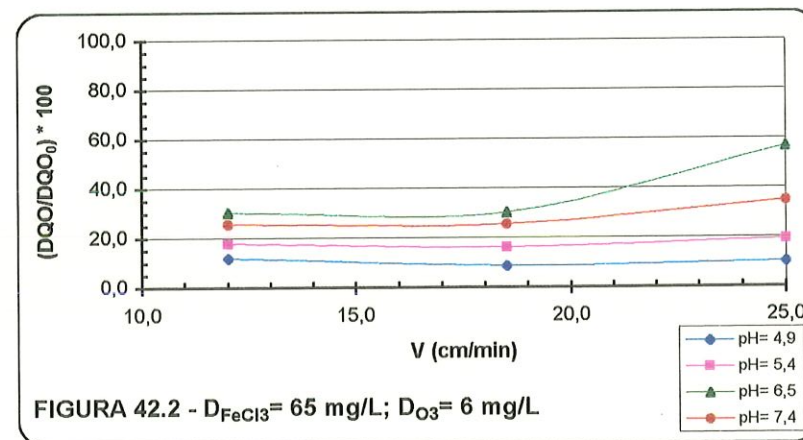
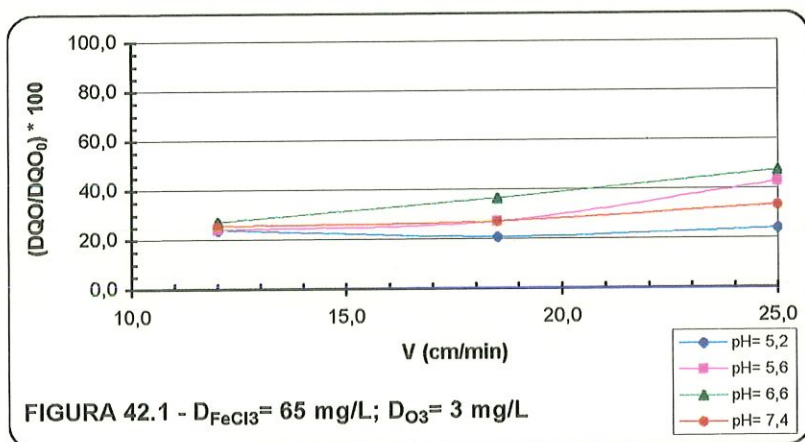


FIGURA 42 - Curvas de flotação para DQO referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 65 mg/L  
(Água Tipo C:  $DQO_0 = 188,0 \text{ mg/L}$ )



Verificando-se as curvas de flotação para DQO, referentes à segunda fase de estudos, apresentadas na FIGURA 40 ( $D_{FeCl_3} = 30$  mg/L) observa-se que, para  $D_{O_3} = 3$  mg/L (FIGURA 40.1), os melhores valores de eficiência de remoção de DQO são aqueles em que o pH é igual a 5,2 e 7,7 para  $V = 12$  cm/min, 5,2, 5,5 e 7,7 para  $V = 18,5$  cm/min e 5,2 para  $V = 25$  cm/min ( $R \cong 54$  % para  $V = 12$  cm/min e pH = 5,5 e 7,7). Verifica-se que, entre os valores de velocidade de flotação compreendidos na faixa de 12 a 25 cm/min, as curvas relativas a todos os valores de pH estudados permanecem praticamente constantes, com suaves inclinações. Quando  $D_{O_3} = 6$  mg/L (FIGURA 40.2) pode-se averiguar que as melhores eficiências de remoção de DQO encontram-se sob pH de 7,7 para  $V = 12$  cm/min, 5,1 e 5,4 para  $V = 18,5$  cm/min e 5,4 para  $V = 25$  cm/min ( $R \cong 61$  %, para pH = 7,7 e  $V = 12$  cm/min). Por sua vez, quando  $D_{O_3} = 9$  mg/L (FIGURA 40.3) supõe-se, à primeira instância, que podem ter havido prováveis falhas na parte experimental, uma vez que o comportamento das curvas referentes aos valores de pH de 5,1 e 5,5 é totalmente atípico. Ainda assim a curva referente ao pH = 5,1 demonstra fornecer o melhor resultado na eficiência de remoção de DQO para  $V = 12$  cm/min ( $R \cong 61$  %).

Investigando-se as curvas de flotação expostas na FIGURA 41 ( $D_{FeCl_3} = 45$  mg/L), pode observar que, para  $D_{O_3} = 3$  mg/L (FIGURA 41.1) os melhores valores de remoção de DQO são aqueles relacionados ao pH = 5,1 para velocidade entre 12 a 18,5 cm/min e 5,4 para velocidade entre 18,5 e 25 cm/min ( $R \cong 71$  % para pH = 5,1 e  $V = 12$  cm/min). Conforme se verifica na FIGURA 41.2 ( $D_{O_3} = 6$  mg/L), o valor de pH de 4,8 oferece o melhor resultado de remoção de DQO para todas as velocidades consideradas ( $R \cong 62$  % para  $V = 12$  cm/min). Observa-se que todas as curvas se comportam de maneira extremamente uniforme. Por sua vez, quando  $D_{O_3} = 9$  mg/L (FIGURA 41.3), pode-se notar que, desta vez, são as curvas relativas aos valores de pH de 4,9 e 7,4 que se mostram bem impróprias ao comportamento característico de curvas de flotação. Para  $V = 12$  cm/min, o melhor valor alcançado é o referente ao pH de 4,9 ( $R \cong 58$  %).

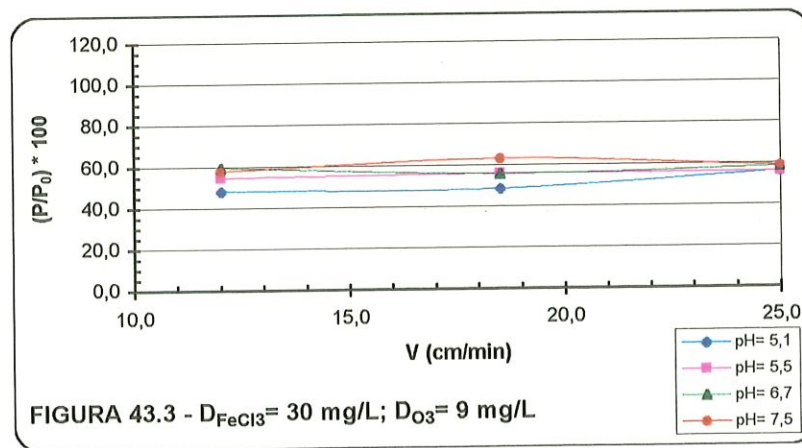
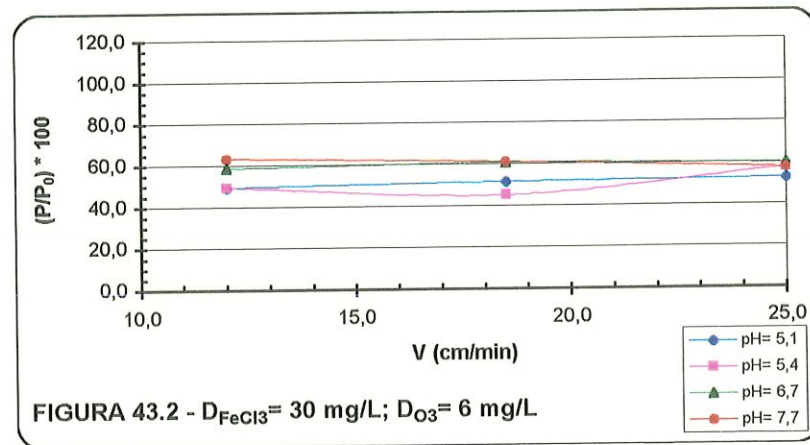
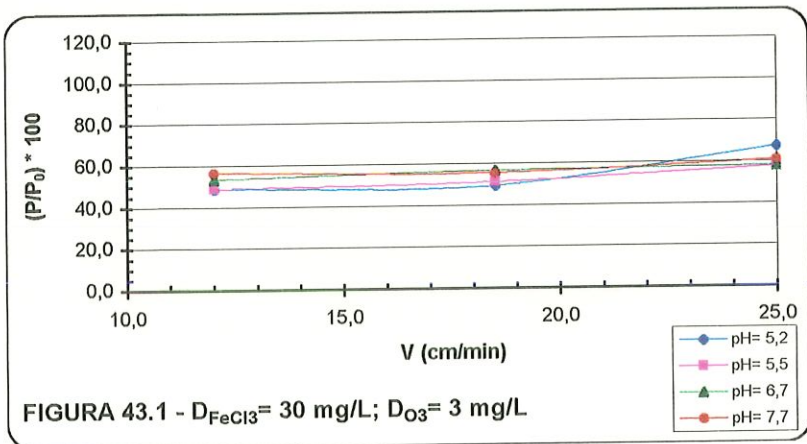
Baseando-se nas curvas de flotação para DQO, ilustradas na FIGURA 42 ( $D_{\text{FeCl}_3} = 65 \text{ mg/L}$ ), pode-se constatar que, quando  $D_{\text{O}_3} = 3 \text{ mg/L}$  (FIGURA 42.1) a característica retilínea das curvas não mais se evidencia para a maioria das velocidades. As melhores remoções são aquelas correspondentes ao valor de pH igual a 5,2 (curva mais uniforme), com  $R \cong 76 \%$  para  $V = 12 \text{ cm/min}$ , sendo que para  $V = 12 \text{ cm/min}$ , seu valor coincide com o das curvas relativas ao pH = 5,6, apresentando pouca diferença para as demais curvas com valores de pH iguais a 7,4 e 6,6. Pode-se observar que na FIGURA 42.2, em que  $D_{\text{O}_3} = 6 \text{ mg/L}$ , a curva de flotação referente ao valor de pH de 4,9 ( $R \cong 88 \%$  para  $V = 12 \text{ cm/min}$ ), proporciona os melhores resultados em todas as velocidades de flotação. Observando-se a FIGURA 42.3, em que  $D_{\text{O}_3} = 9 \text{ mg/L}$ , averigua-se que os resultados mais atraentes são aqueles incluídos entre valor de pH de 4,9, para todas as velocidades estudadas ( $R \cong 84 \%$  e  $V = 12 \text{ cm/min}$ ), ao passo que, para velocidades de flotação entre 12 e 21 cm/min, há mínima diferença entre seus resultados e aqueles referentes aos valores de pH de 5,4 e 7,5.

Examinando-se as curvas de flotação para DQO relacionadas à segunda etapa do presente trabalho, outra vez se observa que os melhores resultados são proporcionados quando o pH se encontra entre 5,0 e 5,5. É nítido notar que, para a DQO, as diferenças entre os valores de sua remoção para dosagens de cloreto férrico de 45 e 65 mg/L são bem pronunciadas, conforme ilustram a FIGURA 41 e a FIGURA 42.

Constata-se ainda, que a dosagem de ozônio igual a 6 mg/L é a que mais favorece a remoção de DQO.

Seguem-se as curvas de flotação referentes à remoção de fosfato total (FIGURA 43 à FIGURA 45).





**FIGURA 43 -** Curvas de flotação para fosfato total referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 30 mg/L (Água Tipo A:  $P_0 = 12,26 \text{ mg/L}$ )

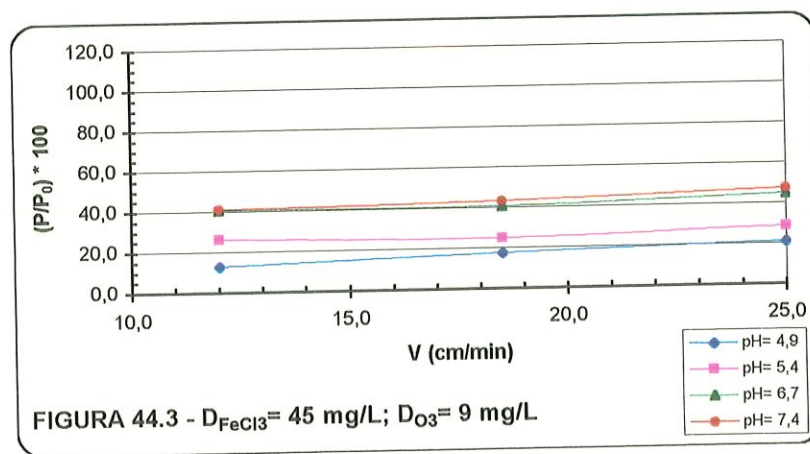
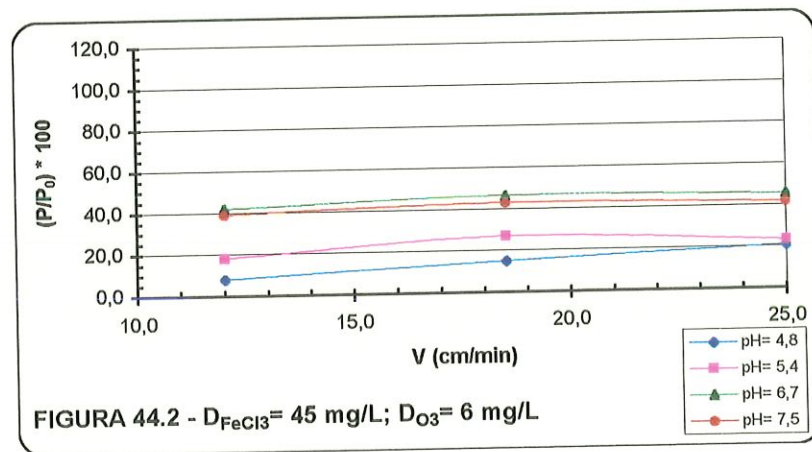
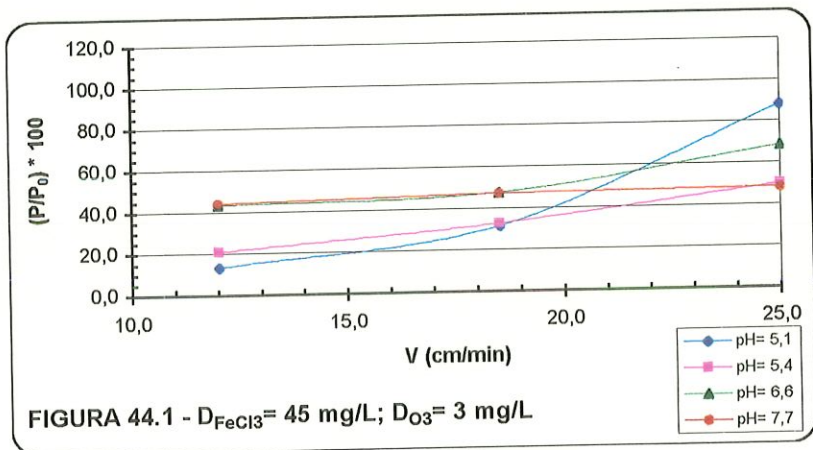


FIGURA 44 - Curvas de flotação para fosfato total referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 45 mg/L (Água Tipo B:  $P_0 = 9,76 \text{ mg/L}$ )



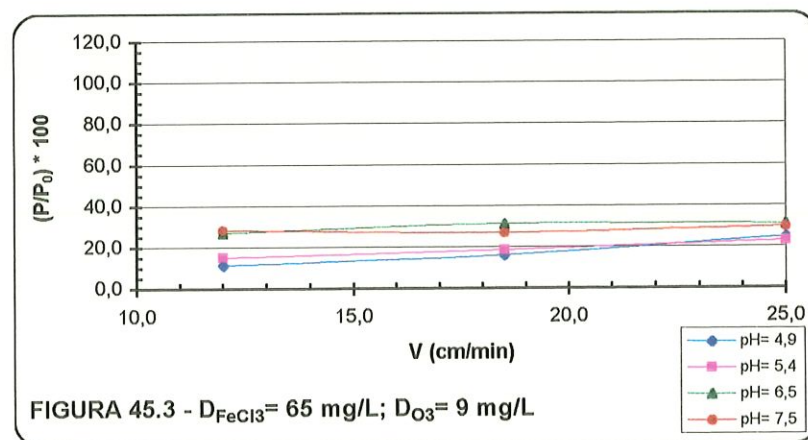
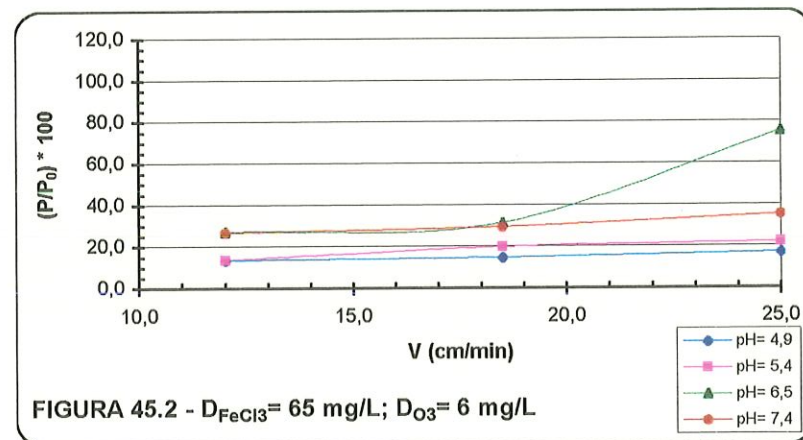
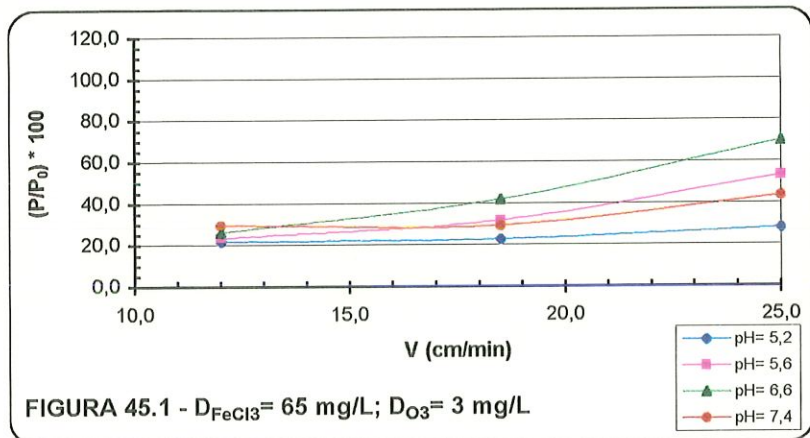


FIGURA 45 - Curvas de flotação para fosfato total referentes à segunda etapa de ensaios com dosagem de cloreto férrico = 65 mg/L (Água Tipo C:  $P_0 = 10,45 \text{ mg/L}$ )

Observando-se as curvas de flotação para P total, referentes à segunda fase de estudos, apresentadas na FIGURA 43 ( $D_{\text{FeCl}_3} = 30 \text{ mg/L}$ ) constata-se que, para  $D_{\text{O}_3} = 3 \text{ mg/L}$  (FIGURA 43.1), os melhores valores de eficiência de remoção de P total são aqueles em que o pH é igual a 5,2 e 5,5 para as velocidades de flotação entre 12 e 18,5 cm/min e 5,5, 6,7 e 7,7 para  $V = 25 \text{ cm/min}$  e 5,2 para  $V = 25 \text{ cm/min}$  ( $R \cong 51 \%$  para  $V = 12 \text{ cm/min}$  e  $\text{pH} = 5,2$  e 5,5). Pode-se verificar que, entre os valores de velocidade de flotação compreendidos na faixa de 12 a 25 cm/min, as curvas relativas a todos os valores de pH estudados permanecem praticamente constantes, com suaves inclinações. Quando  $D_{\text{O}_3} = 6 \text{ mg/L}$  (FIGURA 43.2) pode-se notar que as melhores eficiências de remoção de P total encontram-se sob pH de 5,1 e 5,4 para  $V = 12 \text{ cm/min}$ , 5,4 para  $V = 18,5 \text{ cm/min}$  e 5,1 com  $V = 25 \text{ cm/min}$  ( $R \cong 61 \%$ , para  $\text{pH} = 7,7$  e  $V = 12 \text{ cm/min}$ ). Por sua vez, quando  $D_{\text{O}_3} = 9 \text{ mg/L}$  (FIGURA 43.3) a curva referente ao valor de pH de 5,1 fornece o melhor resultado na eficiência de remoção de P total para  $V = 12 \text{ cm/min}$  ( $R \cong 52 \%$ ), sendo que para  $V = 25 \text{ cm/min}$  não há significativas diferenças entre os valores de remoção de P total alcançados em toda a faixa de pH estudada.

Investigando-se as curvas de flotação expostas na FIGURA 44 ( $D_{\text{FeCl}_3} = 45 \text{ mg/L}$ ), pode observar que, para  $D_{\text{O}_3} = 3 \text{ mg/L}$  (FIGURA 44.1) os melhores valores de remoção de P total são aqueles relacionados ao  $\text{pH} = 5,1$  para velocidade entre 12 a 18,5 cm/min e 5,4 para velocidade entre 18,5 e 25 cm/min ( $R \cong 87 \%$  para  $\text{pH} = 5,1$  e  $V = 12 \text{ cm/min}$ ). Conforme se verifica na FIGURA 44.2 ( $D_{\text{O}_3} = 6 \text{ mg/L}$ ), o valor de pH de 4,8 oferece o melhor resultado de remoção de P total para todas as velocidades consideradas ( $R \cong 92 \%$  para  $V = 12 \text{ cm/min}$ ). Observa-se que todas as curvas se comportam de maneira uniforme. Por sua vez, quando  $D_{\text{O}_3} = 9 \text{ mg/L}$  (FIGURA 44.3), pode-se notar que, desta vez, a aparência retilínea das curvas de flotação torna-se ainda mais evidenciada. Para  $V = 12 \text{ cm/min}$ , o melhor valor alcançado é o referente ao pH de 4,9 ( $R \cong 87 \%$ ).

Baseando-se nas curvas de flotação para P total, ilustradas na FIGURA 45 ( $D_{\text{FeCl}_3} = 65 \text{ mg/L}$ ), pode-se constatar que, quando  $D_{\text{O}_3} = 3 \text{ mg/L}$



(FIGURA 45.1) a característica retilínea das curvas não mais se verifica para a maioria das velocidades. As melhores remoções são aquelas correspondentes ao valor de pH igual a 5,2 (curva mais uniforme), com  $R \cong 79\%$  para  $V = 12$  cm/min, sendo que para  $V = 12$  cm/min, seu valor coincide, de forma aproximada com o das curvas relativas aos valores de pH = 5,6 e 6,6. Pode-se observar que na FIGURA 45.2, em que  $D_{O_3} = 6$  mg/L, a curva de flotação referente ao valor de pH de 4,9 ( $R \cong 87\%$  para  $V = 12$  cm/min), proporciona os melhores resultados em todas as velocidades de flotação, ao passo que, para  $V = 12$  cm/min, seu valor de eficiência de remoção de P total é idêntico àquele relativo ao pH igual a 5,4. Observando-se a FIGURA 45.3, em que  $D_{O_3} = 9$  mg/L, averigua-se que os resultados mais atraentes são aqueles incluídos entre valor de pH de 4,9, para as velocidades entre 12 e 18,5 cm/min ( $R \cong 89\%$  e  $V = 12$  cm/min), ao passo que, para velocidades de flotação entre 18,5 e 25 cm/min, há mínima diferença entre seus resultados e aqueles referentes aos valores obtidos com pH de 5,4, favorecendo ligeiramente esses últimos.

Dessa feita, o que se pode observar sobre as curvas de remoção de fosfato total referentes ao segundo estágio experimental do presente estudo, é que as melhores remoções estão relacionadas a valores de pH entre 5,0 e 5,5 e dosagem de coagulante de 45 e 65 mg/L, tendendo à primeira delas.

No que diz respeito à dosagem de ozônio que proporciona as melhores remoções, predomina a de 6 mg/L.

#### **5.4.1. Análise geral dos resultados da segunda etapa de ensaios**

Torna-se interessante mencionar a verificação do comportamento das curvas de flotação frente à aplicação do ozônio e do cloreto férrico. Investigando-se as FIGURAS 35 e 36, 38 e 39, 41 e 42, 44 e 45, bem como as FIGURAS 15 e 16, 19 e 20, 23 e 24 (primeira etapa de ensaios) pode-se observar que as curvas apresentadas possuem comportamento tendendo a retas. Provavelmente, ocorreu que o ozônio, nas condições de coagulação

química presentes ( $D_{\text{FeCl}_3}$  = 45 e 65 mg/L), provocou aumento no grau de hidrofobicidade dos flocos, resultando em melhores condições de aderência das microbolhas de ar a eles, aumentando o empuxo atuante sobre os flocos e, conseqüentemente, resultando em elevadas velocidades ascensionais na unidade de flotação.

Visando facilitar a discussão geral dos resultados analisados anteriormente, foram elaborados adicionalmente, quadros contendo os dados resultantes da segunda fase, separados por valores de pH. Dessa maneira, será mais claro ao observador, a visualização dos resultados, bem como a concatenação de idéias.

As figuras que se seguem (FIGURA 46 a 50), expõem, portanto, na condição de valores absolutos e em porcentagens de remoção, os dados resultantes dos ensaios realizados na segunda fase do presente estudo, referentes às velocidades de flotação de 12,0 e 18,5 cm/min para turbidez, cor aparente, demanda química de oxigênio e fosfato total, e velocidade de flotação igual a 10 cm/min para alcalinidade.



V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	Turbidez				Turbidez				Turbidez			
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L				
			uT	% R		uT	% R		uT	% R			
12,0	3	A	2,1	93,9	B	2,4	97,8	C	2,4	93,1			
	6		1,3	96,2		1,7	98,4		2,1	94,1			
	9		1,0	97,1		2,2	97,9		0,9	97,5			

FIGURA 46.1 – pH= 5,0 ± 0,2

V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	Turbidez				Turbidez				Turbidez			
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L				
			uT	% R		uT	% R		uT	% R			
12,0	3	A	6,2	82,2	B	3,8	96,4	C	3,9	88,6			
	6		1,8	94,6		3,3	96,9		1,3	96,3			
	9		1,7	95,0		1,6	98,5		1,1	97,0			

FIGURA 46.2 – pH= 5,5 ± 0,2

V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	Turbidez				Turbidez				Turbidez			
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L				
			uT	% R		uT	% R		uT	% R			
12,0	3	A	5,0	85,6	B	37,8	64,0	C	14,9	57,6			
	6		2,8	91,9		27,1	74,2		18,3	47,8			
	9		2,3	93,3		25,0	76,2		20,2	42,2			

FIGURA 46.3 – pH= 6,5 ± 0,2

V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	Turbidez				Turbidez				Turbidez			
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L				
			uT	% R		uT	% R		uT	% R			
12,0	3	A	3,0	91,5	B	16,8	84,0	C	5,7	83,6			
	6		2,0	94,3		14,6	86,1		5,1	85,4			
	9		2,0	94,4		18,8	82,1		12,2	65,1			

FIGURA 46.4 – pH= 7,5 ± 0,2

FIGURA 46 – Resultados da 2ª etapa de ensaios: turbidez remanescente

☛ Turbidez afluente (A= 35,0-45,0; B= 105,0-110,0; C= 35,0-40,0 (uT))

V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	Cor Aparente		Cor Aparente		Cor Aparente				
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L			
			uPtCo	% R		uPtCo	% R			
12,0	3	A	60,5	70,5	B	49,5	86,3	C	66,0	83,1
	6		30,3	85,2		26,4	92,7		38,5	90,1
	9		30,3	85,2		26,4	92,7		24,2	93,8

FIGURA 47.1 – pH= 5,0 ± 0,2

V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	Cor Aparente		Cor Aparente		Cor Aparente				
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L			
			uPtCo	% R		uPtCo	% R			
12,0	3	A	49,5	75,6	B	60,5	83,2	C	78,1	80,0
	6		38,5	81,2		33,0	90,8		34,1	91,3
	9		44,0	78,5		29,7	91,8		26,4	93,2

FIGURA 47.2 – pH= 5,5 ± 0,2

V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	Cor Aparente		Cor Aparente		Cor Aparente				
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L			
			uPtCo	% R		uPtCo	% R			
12,0	3	A	71,5	65,1	B	163,9	54,5	C	150,7	61,4
	6		55,0	73,2		128,7	64,3		146,3	62,5
	9		55,0	73,2		94,6	73,7		116,6	70,1

FIGURA 47.3 – pH= 6,5 ± 0,2

V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	Cor Aparente		Cor Aparente		Cor Aparente				
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L			
			uPtCo	% R		uPtCo	% R			
12,0	3	A	63,3	69,2	B	123,2	65,8	C	148,5	61,9
	6		49,5	76,0		78,1	78,3		122,1	68,7
	9		49,5	76,0		78,1	78,3		96,8	75,2

FIGURA 47.4 – pH= 7,5 ± 0,2

FIGURA 47 – Resultados da 2ª etapa de ensaios: cor aparente remanescente

☛ Cor afluyente (A= 205,0-210,0; B= 360,0-370,0; C= 390,0-398,0 (uPtCo))



V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	DQO		DQO		DQO				
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L			
			mg/L	% R	mg/L	% R	mg/L	% R		
12,0	3	A	39,1	54,0	B	36,3	71,6	C	45,1	76,0
	6		42,0	50,6		48,0	62,5		21,8	88,4
	9		33,2	60,9		53,8	58,0		30,5	83,8

FIGURA 48.1 – pH= 5,0 ± 0,2

V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	DQO		DQO		DQO				
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L			
			mg/L	% R	mg/L	% R	mg/L	% R		
12,0	3	A	42,0	50,6	B	50,9	60,3	C	45,1	76,0
	6		47,8	43,8		65,4	48,9		33,4	82,2
	9		50,7	40,3		59,6	53,4		39,2	79,1

FIGURA 48.2 – pH= 5,5 ± 0,2

V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	DQO		DQO		DQO				
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L			
			mg/L	% R	mg/L	% R	mg/L	% R		
12,0	3	A	44,9	47,2	B	80,0	37,5	C	50,9	72,9
	6		50,7	40,3		74,2	42,1		56,7	69,8
	9		47,8	43,8		74,2	42,1		53,8	71,4

FIGURA 48.3 – pH= 6,5 ± 0,2

V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	DQO		DQO		DQO				
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L			
			mg/L	% R	mg/L	% R	mg/L	% R		
12,0	3	A	39,1	54,0	B	80,0	37,5	C	48,0	74,5
	6		33,2	60,9		71,3	44,3		48,0	74,5
	9		50,7	40,3		71,3	44,3		36,3	80,7

FIGURA 48.4 – pH= 7,5 ± 0,2

FIGURA 48 – Resultados da 2ª segunda etapa de ensaios: DQO remanescente  
 ➤ DQO afluente (A= 85,0; B= 128,0; C= 188,0 (mg/L))

V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	P total		P total		P total				
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L			
			mg/L	% R	mg/L	% R	mg/L	% R		
12,0	3	A	6,0	51,3	B	1,3	87,1	C	2,3	78,5
	6		6,0	50,8		0,8	92,4		1,4	86,6
	9		5,9	51,9		1,2	87,4		1,2	88,6

FIGURA 49.1 – pH= 5,0 ± 0,2

V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	P total		P total		P total				
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L			
			mg/L	% R	mg/L	% R	mg/L	% R		
12,0	3	A	5,9	51,5	B	2,0	72,2	C	2,4	76,8
	6		6,0	50,8		1,8	82,0		1,4	86,8
	9		6,7	45,6		2,5	73,9		1,6	85,0

FIGURA 49.2 – pH= 5,5 ± 0,2

V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	P total		P total		P total				
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L			
			mg/L	% R	mg/L	% R	mg/L	% R		
12,0	3	A	6,5	46,6	B	4,2	56,6	C	2,7	74,2
	6		7,2	41,7		4,1	58,3		2,8	73,0
	9		7,3	40,3		4,0	59,4		2,8	73,1

FIGURA 49.3 – pH= 6,5 ± 0,2

V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	P total		P total		P total				
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L			
			mg/L	% R	mg/L	% R	mg/L	% R		
12,0	3	A	6,9	43,8	B	4,3	56,1	C	3,1	70,6
	6		7,7	36,9		3,8	60,9		2,8	73,5
	9		7,1	42,2		4,0	59,1		2,9	72,0

FIGURA 49.4 – pH= 7,5 ± 0,2

FIGURA 49 – Resultados da 2ª etapa de ensaios: P total remanescente  
 ➡ P total afluente (A= 12,3; B= 9,8; C= 10,5 (mg/L))



V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	Alcalinidade		Alcalinidade		Alcalinidade	
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L mg/L CaCO <sub>3</sub>	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L mg/L CaCO <sub>3</sub>	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L mg/L CaCO <sub>3</sub>
10,0	3	A	31,6	B	15,2	C	45,5
	6		29,7		9,9		23,8
	9		29,7		14,9		7,4

FIGURA 50.1 – pH= 5,0 ± 0,2

V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	Alcalinidade		Alcalinidade		Alcalinidade	
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L mg/L CaCO <sub>3</sub>	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L mg/L CaCO <sub>3</sub>	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L mg/L CaCO <sub>3</sub>
10,0	3	A	45,5	B	30,3	C	44,6
	6		44,6		24,8		39,6
	9		44,6		37,1		33,4

FIGURA 50.2 – pH= 5,5 ± 0,2

V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	Alcalinidade		Alcalinidade		Alcalinidade	
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L mg/L CaCO <sub>3</sub>	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L mg/L CaCO <sub>3</sub>	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L mg/L CaCO <sub>3</sub>
10,0	3	A	166,7	B	123,8	C	163,4
	6		148,5		104,0		155,9
	9		163,4		126,2		155,9

FIGURA 50.3 – pH= 6,5 ± 0,2

V cm/min	D <sub>O3</sub> mg/L	Alcalinidade		Alcalinidade		Alcalinidade	
		Água	D <sub>FeCl3</sub> = 30 mg/L mg/L CaCO <sub>3</sub>	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L mg/L CaCO <sub>3</sub>	Água	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L mg/L CaCO <sub>3</sub>
10,0	3	A	189,6	B	148,5	C	193,1
	6		178,2		133,7		178,2
	9		178,2		163,4		183,2

FIGURA 50.4 – pH= 7,5 ± 0,2

FIGURA 50 – Resultados da 2ª etapa de ensaios: alcalinidade

☛ Alcalinidade afluyente (A= 207,9; B= 178,2; C= 222,8; D= 185,6 (mg/L CaCO<sub>3</sub>))

Procedendo-se à discussão dos resultados, convém, primeiramente, separar os parâmetros determinados em laboratório para, posteriormente, juntá-los e, dessa forma, chegar-se a um ponto em comum e concluir qual a situação que melhor se encaixa a todos eles.

### ○ TURBIDEZ

Analisando-se primeiramente os resultados globais da fase dois referentes à turbidez, verifica-se que as melhores remoções deste parâmetro encontram-se na faixa de pH entre 5,0 e 5,5. Nestas condições, nota-se que para a dosagem de coagulante de 45 mg/L os valores resultantes são tão bons ou às vezes até ligeiramente superiores que aqueles referentes à dosagem de 65 mg/L. Observa-se ainda que as dosagens de ozônio de 6 e 9 mg/L propiciam as melhores remoções, não havendo diferenças significativas entre elas. Salta aos olhos notificar que, quando não se trabalha nas condições ótimas de flotação, há uma inversão curiosa nos dados determinados. Tal fato é claramente observado nas FIGURAS 46.3, 46.4, 34, 35 e 36. Verifica-se que à medida em que se aumenta a dosagem de cloreto férrico, a influência da pré-ozonização na flotação torna-se cada vez mais negativa e a dosagem de ozônio de 9 mg/L torna-se a mais desfavorável.

Assim, resumidamente, para turbidez, pode-se inferir que as melhores remoções ( $v = 12$  cm/min) são:

- pH = 5,0 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{FeCl}_3} = 30$  mg/L;  $D_{\text{O}_3} = 9$  mg/L: 97,1 % e  
 $D_{\text{FeCl}_3} = 30$  mg/L;  $D_{\text{O}_3} = 6$  mg/L: 96,2 % (0,9 % de diferença);  
 $D_{\text{FeCl}_3} = 45$  mg/L;  $D_{\text{O}_3} = 6$  mg/L: 98,4 % e  
 $D_{\text{FeCl}_3} = 45$  mg/L;  $D_{\text{O}_3} = 9$  mg/L: 97,9 % (0,5 % de diferença);  
 $D_{\text{FeCl}_3} = 65$  mg/L;  $D_{\text{O}_3} = 9$  mg/L: 97,5 % e  
 $D_{\text{FeCl}_3} = 65$  mg/L;  $D_{\text{O}_3} = 6$  mg/L: 94,5 % (3,0 % de diferença).

- pH = 5,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{FeCl}_3} = 45$  mg/L;  $D_{\text{O}_3} = 9$  mg/L: 98,5 % e  
 $D_{\text{FeCl}_3} = 45$  mg/L;  $D_{\text{O}_3} = 6$  mg/L: 96,9 % (1,6 % de diferença);  
 $D_{\text{FeCl}_3} = 65$  mg/L;  $D_{\text{O}_3} = 9$  mg/L: 97,0 % e  
 $D_{\text{FeCl}_3} = 65$  mg/L;  $D_{\text{O}_3} = 6$  mg/L: 96,3 % (0,7 % de diferença).



Dessa forma, pode-se dizer que um aumento na dosagem de ozônio de 6 mg/L para 9 mg/L, provoca ligeira melhora na remoção de turbidez, excetuando-se o caso em que a dosagem de coagulante é de 45 mg/L, para o valor de pH de 5,0 ( $\pm 0,2$ ). Porém, é ainda prematuro concluir, qual de todas as condições anteriormente expostas é a mais adequada, em termos de eficiência e realidade, sem antes analisar os demais parâmetros envolvidos.

#### ○ COR APARENTE

No que tange às determinações referentes à cor aparente, observa-se que a faixa de pH que proporciona as melhores remoções encontra-se entre 5,0 e 5,5, conforme constatado também para turbidez. Nota-se que para ambas a velocidade de flotação de 12 cm/min (vide FIGURA 47.1 e FIGURA 47.2) a diferença de resultados correspondentes a esses valores de pH é muito pouco expressiva, o que se pode levar a crer, de antemão, que a escolha do pH de 5,5 em lugar do pH de 5,0 é mais conveniente, uma vez que se utiliza menos ácido clorídrico (vide FIGURA 33).

Mais uma vez, verifica-se que as dosagens de ozônio de 6 e 9 mg/L fornecem os dados mais atraentes, não demonstrando, novamente, grandes divergências entre eles, podendo já se começar a deduzir que a opção pela dosagem de 6 mg/L é mais interessante, do ponto de vista prático e econômico. Vale lembrar que fica clara a contribuição do oxidante na remoção de cor, principalmente em se trabalhando sob condições ótimas de flotação. De acordo com NEBEL (1981), os compostos causadores da cor (compostos orgânicos) incluem numerosas ligações duplas conjugadas, as quais são rapidamente rompidas pela oxidação com o ozônio.

Sumariando-se, as melhores remoções de cor aparente ( $V= 12$  cm/min), são:

- pH= 5,0 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{FeCl_3}= 45$  mg/L;  $D_{O_3}= 6$  mg/L: 92,7 % e

$D_{FeCl_3}= 45$  mg/L;  $D_{O_3}= 9$  mg/L: 92,7 %;

$D_{FeCl_3}= 65$  mg/L;  $D_{O_3}= 9$  mg/L: 93,8 % e

$D_{FeCl_3}= 65$  mg/L;  $D_{O_3}= 6$  mg/L: 90,1 % (3,7 % de diferença).

- pH= 5,5 ( $\pm 0,2$ ):

$$D_{\text{FeCl}_3}= 45 \text{ mg/L}; D_{\text{O}_3}= 9 \text{ mg/L}: 91,8 \% \text{ e}$$

$$D_{\text{FeCl}_3}= 45 \text{ mg/L}; D_{\text{O}_3}= 6 \text{ mg/L}: 90,8 \% \text{ (1,0 \% de diferença);}$$

$$D_{\text{FeCl}_3}= 65 \text{ mg/L}; D_{\text{O}_3}= 9 \text{ mg/L}: 93,2 \% \text{ e}$$

$$D_{\text{FeCl}_3}= 65 \text{ mg/L}; D_{\text{O}_3}= 6 \text{ mg/L}: 91,3 \% \text{ (1,9 \% de diferença).}$$

Antes de se afirmar quais as melhores situações a serem escolhidas, há que se analisar ainda, as influências da pré-ozonização sobre dois dos mais importantes parâmetros de controle de águas residuárias: DQO e fosfato total.

### ○ DQO

Novamente, torna-se nítido observar que as maiores eficiências de remoção de DQO encontram-se entre pH de 5,0 a 5,5 (vide FIGURA 48). Para este parâmetro, é interessante notar que existem significativas diferenças entre os valores relacionados às dosagens de coagulante de 45 e 65 mg/L. A melhora para a última dosagem ( $V= 12 \text{ cm/min}$ ) é bem sensível:

- pH= 5,0 ( $\pm 0,2$ ):

$$D_{\text{FeCl}_3}= 45 \text{ mg/L}; D_{\text{O}_3}= 6 \text{ mg/L}: 62,5 \% \text{ e}$$

$$D_{\text{FeCl}_3}= 45 \text{ mg/L}; D_{\text{O}_3}= 9 \text{ mg/L}: 58,0 \% \text{ (4,5 \% de diferença);}$$

$$D_{\text{FeCl}_3}= 65 \text{ mg/L}; D_{\text{O}_3}= 6 \text{ mg/L}: 88,4 \% \text{ e}$$

$$D_{\text{FeCl}_3}= 65 \text{ mg/L}; D_{\text{O}_3}= 9 \text{ mg/L}: 83,8 \% \text{ (4,6 \% de diferença).}$$

- pH= 5,5 ( $\pm 0,2$ ):

$$D_{\text{FeCl}_3}= 45 \text{ mg/L}; D_{\text{O}_3}= 6 \text{ mg/L}: 48,9 \% \text{ e}$$

$$D_{\text{FeCl}_3}= 45 \text{ mg/L}; D_{\text{O}_3}= 9 \text{ mg/L}: 53,4 \% \text{ (4,5 \% de diferença);}$$

$$D_{\text{FeCl}_3}= 65 \text{ mg/L}; D_{\text{O}_3}= 6 \text{ mg/L}: 82,2 \% \text{ e}$$

$$D_{\text{FeCl}_3}= 65 \text{ mg/L}; D_{\text{O}_3}= 9 \text{ mg/L}: 79,1 \% \text{ (3,1 \% de diferença).}$$

Verifica-se ainda que a dosagem de ozônio correspondente a 6 mg/L é a que mais favorece a remoção de DQO. Uma possível explicação para o fato é que, como o ozônio remove compostos orgânicos suspensos (principais responsáveis pela cor) e dissolvidos, pode ser que, em se aumentando a sua dosagem (de 6 para 9 mg/L), ocorram possíveis interferências no método de determinação de DQO, como por exemplo, na oxidação dos compostos orgânicos pelo dicromato de potássio. Nesta etapa de estudos, bem como na primeira e na terceira, foi determinada



laboratorialmente, apenas a DQO da amostra bruta, deixando a investigação da DQO da amostra filtrada apenas para a quarta etapa, a fim de se viabilizar o trabalho prático. Portanto, ainda não se sabe, nesta segunda fase, se o ozônio é mais atuante na porção orgânica suspensa ou na porção orgânica dissolvida.

#### ○ P TOTAL

Obedecendo à mesma regra seguida pelos parâmetros anteriores, pode-se constatar que, também para fosfato total, as melhores remoções encontram-se na faixa de pH entre 5,0 e 5,5 (vide FIGURA 49):

- pH= 5,0 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{FeCl}_3} = 45 \text{ mg/L}$ ;  $D_{\text{O}_3} = 6 \text{ mg/L}$ : 92,4 % e  
 $D_{\text{FeCl}_3} = 45 \text{ mg/L}$ ;  $D_{\text{O}_3} = 9 \text{ mg/L}$ : 87,4 % (5,0 % de diferença);  
 $D_{\text{FeCl}_3} = 65 \text{ mg/L}$ ;  $D_{\text{O}_3} = 9 \text{ mg/L}$ : 88,6 % e  
 $D_{\text{FeCl}_3} = 65 \text{ mg/L}$ ;  $D_{\text{O}_3} = 6 \text{ mg/L}$ : 86,6 % (2,0 % de diferença).

- pH= 5,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{FeCl}_3} = 45 \text{ mg/L}$ ;  $D_{\text{O}_3} = 6 \text{ mg/L}$ : 82,0 % e  
 $D_{\text{FeCl}_3} = 45 \text{ mg/L}$ ;  $D_{\text{O}_3} = 9 \text{ mg/L}$ : 73,9 % (8,1 % de diferença);  
 $D_{\text{FeCl}_3} = 65 \text{ mg/L}$ ;  $D_{\text{O}_3} = 6 \text{ mg/L}$ : 86,8 % e  
 $D_{\text{FeCl}_3} = 65 \text{ mg/L}$ ;  $D_{\text{O}_3} = 9 \text{ mg/L}$ : 85,0 % (1,8 % de diferença).

Nota-se que a melhor dosagem de ozônio é, predominantemente, a de 6 mg/L. Para tanto, apesar de a dosagem de coagulante de 45 mg/L (para pH de 5,0 ( $\pm 0,2$ )) propiciar a maior remoção de fosfato total, não se pode tomá-la, ainda, como a ideal, uma vez que, como mencionado anteriormente, deve-se chegar a um resultado comum para todos os parâmetros envolvidos.

#### ○ ALCALINIDADE

Observa-se que, para a alcalinidade, os maiores consumos também se encontram entre os valores de pH de 5,0 e 5,5 (vide FIGURA 50):

- pH= 5,0 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{FeCl}_3} = 45 \text{ mg/L}$ ;  $D_{\text{O}_3} = 6 \text{ mg/L}$ : 94,4 % e  
 $D_{\text{FeCl}_3} = 45 \text{ mg/L}$ ;  $D_{\text{O}_3} = 9 \text{ mg/L}$ : 91,7 % (2,7 % de diferença);  
 $D_{\text{FeCl}_3} = 65 \text{ mg/L}$ ;  $D_{\text{O}_3} = 9 \text{ mg/L}$ : 96,7 % e  
 $D_{\text{FeCl}_3} = 65 \text{ mg/L}$ ;  $D_{\text{O}_3} = 6 \text{ mg/L}$ : 89,3 % (7,4 % de diferença).

- pH= 5,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{FeCl}_3}$ = 45 mg/L;  $D_{\text{O}_3}$ = 6 mg/L: 86,1 % e

$D_{\text{FeCl}_3}$ = 45 mg/L;  $D_{\text{O}_3}$ = 9 mg/L: 79,2 % (6,9 % de diferença);

$D_{\text{FeCl}_3}$ = 65 mg/L;  $D_{\text{O}_3}$ = 9 mg/L: 85,0 % e

$D_{\text{FeCl}_3}$ = 65 mg/L;  $D_{\text{O}_3}$ = 6 mg/L: 82,2 % (2,8 % de diferença).

Confirma-se que o maior consumo de alcalinidade é aquele em que o valor do pH se encontra por volta de 5,0, com dosagens máximas de coagulante e oxidante. Em função da faixa de variação do pH da água de estudo, encontra-se presente somente a alcalinidade devida a bicarbonatos (pH entre 8,3 e 4,6), possibilitando a reação direta com o ozônio.

Vale salientar que, desta avaliação dos dados resultantes da segunda etapa deste trabalho, pôde-se ter uma boa noção dos efeitos do ozônio quando previamente aplicado à flotação por ar dissolvido da água de estudo. Em termos de pH, ficou bastante evidente que a melhor faixa de trabalho foi aquela correspondente aos valores mais baixos, entre 5,0 e 5,5. A pequena diferença entre seus resultados, conduziu à escolha do maior valor (pH= 5,5) como o mais conveniente, em termos práticos e econômicos, por requerer menos ácido clorídrico para a sua correção além de não ser recomendável trabalhar-se com pH muito ácido. Quanto à dosagem de oxidante a ser aplicada, a de 6 mg/L mostrou-se a mais adequada.

Neste estágio experimental, é essencial reparar nas consideráveis variações das características da água de estudo (efluente do reator anaeróbio). Esse fator preponderante (vide FIGURA 33) fez surgir a necessidade de verificação adicional do que ocorreria, para um mesmo tipo de afluente do sistema, caso se estudasse duas dosagens de ozônio (0 e 6 mg/L) e correspondentes dosagens de cloreto férrico (0, 45 e 65 mg/L) para dois valores de pH: o de 5,5 e o natural (sem adição de ácido clorídrico). Portanto, foi programada uma terceira etapa de ensaios a serem realizados num único dia, a fim de se obter uma resposta final sobre a melhor situação testada.



### **5.5. Resultados dos ensaios referentes à terceira etapa de estudo**

Na figura seguinte (FIGURA 51), são expostos, na forma de um quadro geral, os valores resultantes das determinações e análises físico-químicas e exames bacteriológicos característicos das amostras pré-ozonizadas e flotadas, consoante metodologia descrita no capítulo anterior, relacionados aos ensaios executados na terceira fase do presente estudo. Os dados são mostrados em sua forma completa e referem-se apenas à velocidade de flotação de 12 cm/min.

	Ensaio com controle de pH						Ensaio sem controle de pH					
	6			0			6			0		
<b><i>D</i><sub>O<sub>3</sub></sub></b> (mg/L)												
<b><i>D</i><sub>FeCl<sub>3</sub></sub></b> (mg/L)	0	45	65	0	45	65	0	45	65	0	45	65
<b>pH</b>	5,6	5,5	5,4	5,7	5,6	5,4	7,4	6,8	6,6	6,9	6,7	6,5
<b><i>D</i><sub>HCl 1%</sub></b> (ml/L)	26,7	25,6	25,0	27,8	25,6	25,0	0	0	0	0	0	0
<b>Turb.</b> (uT)	59,1	9,7	2,5	59,0	14,1	6,6	64,6	25,7	15,2	82,0	43,1	42,6
<b>% R</b>	33,2	89,0	97,2	33,3	84,1	92,5	27,0	71,0	82,8	7,3	51,3	51,9
<b>Cor Ap.</b> (uPtCo)	561,0	108,9	35,2	580,3	176,0	75,9	561,0	360,8	267,3	624,3	432,3	381,7
<b>% R</b>	62,0	92,6	97,6	60,7	88,1	94,9	62,0	75,5	81,9	57,7	70,7	74,1
<b>DQO</b> (mg/L)	178,9	94,4	74,0	190,5	100,2	94,4	176,0	114,8	100,2	187,7	126,5	120,7
<b>% R</b>	30,7	63,4	71,3	26,2	61,2	63,4	31,8	55,5	61,2	27,3	51,0	53,2
<b>P total</b> (mg/L)	8,4	3,1	1,2	8,4	4,1	1,8	9,1	4,7	2,8	9,2	5,6	4,1
<b>% R</b>	23,3	71,7	88,9	23,3	62,7	83,9	16,2	56,6	74,8	15,2	48,5	62,7
<b>Alcalin.</b> (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	66,8	41,6	29,7	66,8	45,5	34,1	190,8	161,1	151,5	188,1	167,1	151,5

➤ **Efluente do Reator Anaeróbio** ◀

pH	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uPtCo)	DQO (mg/L)	P Total (mg/L)	Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )
6,9	90,5-88,5	655,0-665,0	258,0	10,9	222,8

➤ **Afluente do Reator Anaeróbio** ◀

pH	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uPtCo)	DQO (mg/L)	P Total (mg/L)	Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )
7,0	150,0-160,0	1475,0-1485,0	599,0	8,9	126,2

FIGURA 51 – Resultados referentes à terceira etapa de ensaios com velocidade de flotação = 12 cm/min)



Pelo que se pode observar, a terceira etapa de ensaios esclarece quaisquer dúvidas ou suposições feitas nas etapas anteriores. Nota-se que, para todos os parâmetros envolvidos, a dosagem de ozônio de 6 mg/L influi significativamente em suas remoções. A maior dosagem de cloreto férrico também influencia na melhora dos resultados.

Dessa forma, constata-se que o melhoramento na eficiência de remoção dos parâmetros analisados (turbidez, cor aparente, DQO e P total) é bem evidente quando se aplica o ozônio e, sobretudo, conjuntamente à correção do pH (por volta de 5,5) e à utilização da maior dosagem de cloreto férrico.

Assim, avaliando-se todas as variáveis separadamente, tem-se as seguintes remoções e suas diferenças:

⇒ TURBIDEZ ( $D_{\text{FeCl}_3}$  = 65 mg/L):

pH = 5,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L ⇒ Remoção = 97,2 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L ⇒ Remoção = 92,5 % (diferença de 4,7 %);

pH = 6,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L ⇒ Remoção = 82,8 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L ⇒ Remoção = 51,9 % (diferença de 30,9 %).

Diferença entre as duas melhores remoções: 14,4 %.

⇒ COR APARENTE ( $D_{\text{FeCl}_3}$  = 65 mg/L):

pH = 5,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L ⇒ Remoção = 97,6 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L ⇒ Remoção = 94,9 % (diferença de 2,7 %);

pH = 6,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L ⇒ Remoção = 81,9 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L ⇒ Remoção = 74,1 % (diferença de 7,8 %).

Diferença entre as duas melhores remoções: 15,7 %.

⇒ DQO ( $D_{\text{FeCl}_3}$  = 65 mg/L):

pH = 5,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 71,3 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 63,4 % (diferença de 7,9 %);

pH = 6,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 61,2 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 53,2 % (diferença de 8,0 %).

Diferença entre as duas melhores remoções: 10,1 %.

⇒ P TOTAL ( $D_{\text{FeCl}_3}$  = 65 mg/L):

pH = 5,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 88,9 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 83,9 % (diferença de 5,0 %);

pH = 6,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 74,8 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 62,7 % (diferença de 12,1 %).

Diferença entre as duas melhores remoções: 14,1 %.

Com a efetuação da terceira etapa de estudos, pôde-se, finalmente, obter uma boa noção dos efeitos da pré-ozonização antecedendo a flotação por ar dissolvido do efluente de um reator anaeróbio com chicanas tratando esgoto sanitário. Decidiu-se, então pela execução de análise mais apurada das amostras, originando, assim, a quarta e última fase do trabalho.

É digno de nota lembrar que os comentários finais a respeito dos resultados alcançados com a realização dos ensaios encontram-se posteriormente à exposição dos dados obtidos na quarta etapa do presente estudo.



## **5.6. Resultados dos ensaios referentes à quarta etapa de estudo**

Para esta nova situação experimental (vide FIGURA 11 no Capítulo 4) não foi testada a dosagem nula de coagulante. Os demais arranjos de ensaios permaneceram os mesmos do estágio anterior.

A seguir, os resultados da quarta etapa são mostrados na forma de um quadro geral (FIGURA 52).

	Ensaio com controle de pH				Ensaio sem controle de pH			
	6		0		6		0	
$D_{O_3}$ (mg/L)								
$D_{FeCl_3}$ (mg/L)	45	65	45	65	45	65	45	65
pH	5,3	5,4	5,4	5,4	6,7	6,6	6,4	6,3
$D_{HCl\ 1\%}$ (ml/L)	22,8	20,0	19,4	17,8	0	0	0	0
Turb. (uT)	3,6	2,1	14,6	7,2	21,5	14,5	41,8	27,5
% R	94,9	97,0	79,4	89,9	69,8	79,5	41,1	61,3
Cor Ap. (uPtCo)	75,9	55,0	204,6	121,0	305,8	272,8	332,2	287,1
% R	88,8	91,9	69,8	82,1	54,9	59,7	51,0	57,6
DQO (mg/L)	71,0	50,7	76,9	59,5	85,7	79,9	100,2	94,4
% R	72,6	80,4	70,3	77,0	66,9	69,2	61,3	63,5
$DQO_{Filtr.}$ (mg/L)	62,4	47,8	68,2	56,5	56,5	47,8	62,4	56,5
% R	47,6	59,8	42,7	52,5	52,5	59,8	47,6	52,5
P total (mg/L)	1,6	0,7	2,3	1,0	2,5	1,6	3,4	2,1
% R	83,7	93,4	76,4	89,6	75,2	84,3	65,5	79,0
N total (mg/L)	34,5	32,5	29,8	29,8	33,8	29,8	35,1	35,1
% R	16,3	21,2	27,7	27,7	17,9	27,7	14,7	14,7
DBO (mg/L)	35,2	23,1	41,8	40,7	70,4	67,1	61,6	61,6
% R	68,0	79,0	62,0	63,0	36,0	39,0	44,0	44,0

FIGURA 52 – Resultados referentes à quarta etapa de ensaios com velocidade de flotação = 12 cm/min)

- Efluente do reator anaeróbio: pH= 6,8; Turbidez= 71-78 (uT); Cor ap.= 677-685 (uPtCo); DQO= 259 mg/L;  $DQO_{Filtr.}$  = 119 mg/L; P total= 9,9 mg/L; COT= 31,6 ppm; N total= 41,2 mg/L; N amoniacal= 10,3 mg/L; DBO= 110 mg/L.
- Afluente do reator anaeróbio: pH= 6,9; Turbidez= 145-155 (uT); Cor ap.= 1130-1140 (uPtCo); DQO= 577 mg/L;  $DQO_{Filtr.}$  = 283 mg/L; P total= 10,4 mg/L; COT= 55,3 ppm; N total= 51,3 mg/L; N amoniacal= 12,8 mg/L; DBO= 185 mg/L.





No que diz respeito à turbidez, à cor aparente, à DQO e ao fosfato total, observa-se que suas correspondentes eficiências de remoção seguem a mesma lógica verificada na etapa anterior: apresentam melhora quando o ozônio é aplicado, sobretudo quando conjuntamente à correção do pH (por volta de 5,5) e ao emprego da maior dosagem de cloreto férrico (65 mg/L).

Avaliando-se tais parâmetros separadamente, tem-se as seguintes melhores eficiências de remoção e suas diferenças:

⇒ TURBIDEZ ( $D_{\text{FeCl}_3}$  = 65 mg/L):

pH = 5,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L ⇒ Remoção = 97,0 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L ⇒ Remoção = 89,9 % (diferença de 7,1 %);

pH = 6,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L ⇒ Remoção = 79,5 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L ⇒ Remoção = 61,3 % (diferença de 18,2 %).

Diferença entre as duas melhores remoções: 17,5 %.

⇒ COR APARENTE ( $D_{\text{FeCl}_3}$  = 65 mg/L):

pH = 5,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L ⇒ Remoção = 91,9 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L ⇒ Remoção = 82,1 % (diferença de 9,8 %);

pH = 6,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L ⇒ Remoção = 59,7 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L ⇒ Remoção = 57,6 % (diferença de 2,1 %).

Diferença entre as duas melhores remoções: 32,2 %.

⇒ DQO ( $D_{\text{FeCl}_3}$  = 65 mg/L):

pH = 5,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L ⇒ Remoção = 80,4 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L ⇒ Remoção = 77,0 % (diferença de 3,4 %);

pH = 6,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L ⇒ Remoção = 69,2 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L ⇒ Remoção = 63,5 % (diferença de 5,7 %).

Diferença entre as duas melhores remoções: 11,2 %.

➔ P TOTAL ( $D_{\text{FeCl}_3}$  = 65 mg/L):

pH = 5,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 93,4 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 89,6 % (diferença de 3,8 %);

pH = 6,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 84,3 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 79,0 % (diferença de 5,3 %).

Diferença entre as duas melhores remoções: 9,1 %.

Em se determinando a DQO filtrada, verifica-se que o ozônio influi em sua eficiência de remoção, a qual é melhorada quando se aplica a dosagem de cloreto férrico de 65 mg/L, para ambos os valores de pH. Observa-se curiosamente que, ao se aplicar a dosagem de 45 mg/L de coagulante sem o controle do pH, ocorre uma melhora dos dados obtidos em relação àqueles sob pH de  $5,5 \pm 0,2$ , com respectiva aplicação de ozônio, ou não. O mesmo não se constata quando a dosagem de cloreto férrico é igual a 65 mg/L. Para esta dosagem, o controle de pH em nada altera os resultados. A seguir, tem-se um resumo destas verificações:

➔ DQO FILTRADA ( $D_{\text{FeCl}_3}$  = 45 mg/L):

pH = 5,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 47,6 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 42,7 % (diferença de 4,9 %);

pH = 6,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 52,5 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 47,6 % (diferença de 4,9 %).

Diferença entre as duas melhores remoções: 4,9 %.

➔ DQO FILTRADA ( $D_{\text{FeCl}_3}$  = 65 mg/L):

pH = 5,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 59,8 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 52,5 % (diferença de 7,3 %);

pH = 6,5 ( $\pm 0,2$ ):

$D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 59,8 %;

$D_{\text{O}_3}$  = 0 mg/L  $\Rightarrow$  Remoção = 52,5 % (diferença de 7,3 %).

Diferença entre as duas melhores remoções: 0.



No que tange à DQO filtrada pode ser observado, pela sua diferença com a DQO bruta (vide respectivos valores na FIGURA 52), que a maior porção removida deste parâmetro refere-se à matéria orgânica dissolvida na massa líquida. Ressalta-se, que esta divergência é acentuada nos ensaios em que se mantém o pH por volta de 5,5:

↳ pH= 5,5 ( $\pm 0,2$ )  $\rightarrow$   $D_{\text{FeCl}_3}$ = 45 mg/L

$D_{\text{O}_3}$ = 0: diferença entre as remoções de DQO e de  $\text{DQO}_{\text{Filtrada}}$ = 27,6 %;

$D_{\text{O}_3}$ = 6 mg/L: diferença entre as remoções de DQO e de  $\text{DQO}_{\text{Filtrada}}$ = 25,0 %;

↳ pH= 5,5 ( $\pm 0,2$ )  $\rightarrow$   $D_{\text{FeCl}_3}$ = 65 mg/L

$D_{\text{O}_3}$ = 0: diferença entre as remoções de DQO e de  $\text{DQO}_{\text{Filtrada}}$ = 24,5 %;

$D_{\text{O}_3}$ = 6 mg/L: diferença entre as remoções de DQO e de  $\text{DQO}_{\text{Filtrada}}$ = 20,6 %;

↳ pH= 6,5 ( $\pm 0,2$ )  $\rightarrow$   $D_{\text{FeCl}_3}$ = 45 mg/L

$D_{\text{O}_3}$ = 0: diferença entre as remoções de DQO e de  $\text{DQO}_{\text{Filtrada}}$ = 13,7 %;

$D_{\text{O}_3}$ = 6 mg/L: diferença entre as remoções de DQO e de  $\text{DQO}_{\text{Filtrada}}$ = 14,4 %;

↳ pH= 6,5 ( $\pm 0,2$ )  $\rightarrow$   $D_{\text{FeCl}_3}$ = 65 mg/L

$D_{\text{O}_3}$ = 0: diferença entre as remoções de DQO e de  $\text{DQO}_{\text{Filtrada}}$ = 11,0 %;

$D_{\text{O}_3}$ = 6 mg/L: diferença entre as remoções de DQO e de  $\text{DQO}_{\text{Filtrada}}$ = 9,4 %.

Nota-se também, pela análise acima, que o ozônio pouco interfere nas diferenças determinadas.

Com base nos valores relativos ao nitrogênio total, repara-se que o ozônio prejudica as remoções quando se trabalha com pH na faixa de 5,5 e auxilia, quando o pH natural ( $\pm 6,5$ ) é testado. É curioso notar que quando o oxidante não é aplicado, os valores das porcentagens removidas não se alteram para as diferentes dosagens de cloreto férrico. A melhor eficiência de remoção de nitrogênio total é de 27,7 % nas seguintes situações:

- $D_{\text{O}_3}$ = 0 para  $D_{\text{FeCl}_3}$ = 45 mg/L e pH= 5,5 ( $\pm 0,2$ );
- $D_{\text{O}_3}$ = 0 para  $D_{\text{FeCl}_3}$ = 65 mg/L e pH= 5,5 ( $\pm 0,2$ );
- $D_{\text{O}_3}$ = 6 mg/L para  $D_{\text{FeCl}_3}$ = 65 mg/L e pH= 5,5 ( $\pm 0,2$ ).

Pode-se constatar, portanto, que o pós-tratamento utilizado é pouco eficaz na remoção do nitrogênio total. Tal fato talvez ocorra devido ao caráter físico-químico do sistema.

A respeito dos dados obtidos das análises de DBO, o que se pode verificar é que a melhor situação é aquela em que se aplica 6 mg/L de ozônio, com pH de 5,5 e dosagem de coagulante de 65 mg/L (79,0 % de remoção). É conveniente reparar que, quando se controla o valor do pH a 5,5, o efeito benéfico do oxidante na remoção de DBO associado ao aumento da dosagem de coagulante para tais condições de pH, é evidenciado. Já quando se trabalha nas situações de pH natural (sem adição de HCl), observa-se que a influência do ozônio não favorece a qualidade amostral, como pode ser constatado na FIGURA 52.

Desta análise de DBO, pode-se inferir que o pós-tratamento estudado, em sua condição mais recomendada ( $D_{\text{FeCl}_3}$  = 65 mg/L;  $D_{\text{O}_3}$  = 6 mg/L e pH = 5,5), proporciona uma considerável remoção deste parâmetro. O ozônio, associado à flotação, remove porção significativa da matéria orgânica biodegradável presente na amostra.

O que se pode afirmar, observando-se todas as análises feitas, sobretudo aquelas referentes à turbidez, cor aparente, DQO, P total e DBO, é que a aplicação do ozônio permite o aumento da eficiência da flotação por ar dissolvido tanto para a dosagem de coagulante de 45 mg/L como para a dosagem de 65 mg/L, em ambas as condições de pH estudadas (excetuando-se a DBO, com pH natural).

Uma questão bem interessante que merece ser comentada, é aquela a respeito da economia de coagulante com a aplicação do ozônio quando o parâmetro de interesse for turbidez, cor aparente, DQO e DBO. Neste caso, os valores resultantes desses parâmetros, para os dois tipos de ensaios (com controle de pH e sem controle de pH) realizados na terceira e quarta etapas de estudo, foram:



① TURBIDEZ*3ª etapa de estudo:*

pH= 5,5;	D <sub>O3</sub> = 6 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	→	Remoção= 89,0 %;
pH= 5,4;	D <sub>O3</sub> = 0 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L	→	Remoção= 92,5 % (-3,5 %);
pH= 6,8;	D <sub>O3</sub> = 6 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	→	Remoção= 71,0 %;
pH= 6,5;	D <sub>O3</sub> = 0 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L	→	Remoção= 51,9 % (+19,1%);

*4ª etapa de estudo:*

pH= 5,3;	D <sub>O3</sub> = 6 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	→	Remoção= 94,9 %;
pH= 5,4;	D <sub>O3</sub> = 0 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L	→	Remoção= 89,9 % (+5,0 %);
pH= 6,7;	D <sub>O3</sub> = 6 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	→	Remoção= 69,8 %;
pH= 6,3;	D <sub>O3</sub> = 0 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L	→	Remoção= 61,3 % (+8,5 %);

② COR APARENTE*3ª etapa de estudo:*

pH= 5,5;	D <sub>O3</sub> = 6 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	→	Remoção= 92,6 %;
pH= 5,4;	D <sub>O3</sub> = 0 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L	→	Remoção= 94,9 % (-2,3 %);
pH= 6,8;	D <sub>O3</sub> = 6 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	→	Remoção= 75,5 %;
pH= 6,5;	D <sub>O3</sub> = 0 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L	→	Remoção= 74,1 % (+1,4 %);

*4ª etapa de estudo:*

pH= 5,3;	D <sub>O3</sub> = 6 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	→	Remoção= 88,8 %;
pH= 5,4;	D <sub>O3</sub> = 0 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L	→	Remoção= 82,1 % (+6,7 %);
pH= 6,7;	D <sub>O3</sub> = 6 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	→	Remoção= 54,9 %;
pH= 6,3;	D <sub>O3</sub> = 0 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L	→	Remoção= 57,6 % (-2,7 %);

③ DQO*3ª etapa de estudo:*

pH= 5,5;	D <sub>O3</sub> = 6 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	→	Remoção= 63,4 %;
pH= 5,4;	D <sub>O3</sub> = 0 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L	→	Remoção= 63,4 % (0);
pH= 6,8;	D <sub>O3</sub> = 6 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	→	Remoção= 55,5 %;
pH= 6,5;	D <sub>O3</sub> = 0 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L	→	Remoção= 53,2 % (+2,3 %);

*4ª etapa de estudo:*

pH= 5,3;	D <sub>O3</sub> = 6 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	→	Remoção= 72,6 %;
pH= 5,4;	D <sub>O3</sub> = 0 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L	→	Remoção= 77,0 % (-4,4 %);
pH= 6,7;	D <sub>O3</sub> = 6 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 45 mg/L	→	Remoção= 66,9 %;
pH= 6,3;	D <sub>O3</sub> = 0 mg/L;	D <sub>FeCl3</sub> = 65 mg/L	→	Remoção= 63,5 % (+3,4 %);

#### ④ DBO

##### *4ª etapa de estudo:*

pH= 5,3;  $D_{O_3}$ = 6 mg/L;  $D_{FeCl_3}$ = 45 mg/L → Remoção= 68,0 %;  
pH= 5,4;  $D_{O_3}$ = 0 mg/L;  $D_{FeCl_3}$ = 65 mg/L → Remoção= 63,0 % (+5,0 %).

Obs.: ensaios sem controle de pH não apresentaram evidência de economia de coagulante para DBO.

Pode-se observar que, para cada um dos parâmetros envolvidos nesta análise, existem pelo menos duas situações (envolvendo as duas etapas de estudo, excetuando-se a DBO, a qual foi determinada apenas na quarta etapa de estudo) que se mostram favoráveis à constatação de efeito de economia de coagulante devido à aplicação do ozônio. Para estes casos positivos, observa-se que quando o ozônio é aplicado e utiliza-se uma dosagem menor de cloreto férrico, os resultados das eficiências de remoção de turbidez, cor, DQO e DBO são praticamente os mesmos, ou por vezes até melhores que os referentes à situação em que não se emprega o oxidante, mas aumenta-se a porção do coagulante. Pode-se notar que, quando tal constatação não se verifica, ainda assim as diferenças entre ambos os casos ( $D_{FeCl_3}$ = 45 mg/L, com  $D_{O_3}$ = 6 mg/L e  $D_{FeCl_3}$ = 65 mg/L, com  $D_{O_3}$ =0) não é significativa (no máximo 4,4 % para DQO, relativa à quarta etapa de trabalho, com pH ao redor de 5,5).

Portanto pode-se dizer que a aplicação do ozônio permite que se tome partido de duas situações favoráveis, porém excludentes. A primeira delas seria o caso em que se almejasse tão somente a maximização da eficiência da flotação em relação à remoção dos principais parâmetros de interesse (DQO, DBO, P total, turbidez, cor aparente) sem a diminuição da dosagem de coagulante ( $D_{FeCl_3}$ = 65 mg/L, com  $D_{O_3}$ = 6 mg/L). Uma segunda situação possível seria aquela em que se desejasse manter aproximadamente a mesma eficiência de flotação (na remoção de parâmetros como turbidez, cor, DQO e DBO (com exceção de P total), porém, reduzindo-se a dosagem de coagulante com conseqüente diminuição na geração de lodo. Neste último caso, poder-se-ia optar pela aplicação de 45 mg/L de cloreto férrico, com dosagem de ozônio de 6 mg/L.



### 5.7. Resultados dos ensaios referentes à análise de coliformes fecais e totais

Para finalizar o presente capítulo, resta expor e comentar os resultados obtidos dos ensaios concernentes aos coliformes totais e fecais, realizados separadamente à quarta etapa.

Os dados resultantes são mostrados na FIGURA 53.

	Coliformes Fecais (NMP/100 ml)	Coliformes Totais (NMP/100 ml)
<i>Efluente do reator anaeróbio</i>	$2,0 \times 10^7$	$7,4 \times 10^7$
Após FAD $\Rightarrow$ $D_{HCl} = 36$ mg/L pH= 5,3; $D_{FeCl_3} = 65$ mg/L; $D_{O_3} = 0$ mg/L	$3,0 \times 10^3$	$1,5 \times 10^4$
Após ozonização e FAD $\Rightarrow$ $D_{HCl} = 36$ mg/L pH= 5,3; $D_{FeCl_3} = 65$ mg/L; $D_{O_3} = 6$ mg/L	$3,1 \times 10^3$	$2,2 \times 10^4$
Após ozonização e FAD $\Rightarrow$ $D_{HCl} = 0$ pH= 6,3; $D_{FeCl_3} = 65$ mg/L; $D_{O_3} = 6$ mg/L	$3,1 \times 10^3$	$5,2 \times 10^4$
Após ozonização (sem FAD) $D_{O_3} = 6$ mg/L (4 min + 30 s)	$3,5 \times 10^5$	$1,6 \times 10^6$
Após ozonização (sem FAD) $D_{O_3} = 12$ mg/L (9 min + 40 s)	$9,7 \times 10^4$	$8,6 \times 10^5$
Após ozonização (sem FAD) $D_{O_3} = 18$ mg/L (13 min + 50 s)	$3,1 \times 10^4$	$3,1 \times 10^5$

FIGURA 53 – Resultados dos ensaios referentes a coliformes totais e fecais

A primeira impressão que se tem, ao observar a FIGURA 53, é a de surpresa, quando se depara principalmente com os resultados obtidos com as amostras ozonizadas. Nota-se que somente o ozônio não foi capaz de remover coliformes totais e fecais (valores residuais de  $3,5 \times 10^5$  a  $3,1 \times 10^4$  (NMP/100 ml) para coliformes fecais e valores residuais de  $1,6 \times 10^6$  a  $3,1 \times 10^5$  (NMP/100 ml) para coliformes totais) tanto quanto a coagulação/flotação (valores residuais da ordem de  $10^3$  para coliformes fecais e valores da

ordem de  $10^4$  para coliformes totais), mesmo que a dosagem aplicada do desinfetante seja consideravelmente elevada (18 mg/L).

Conforme os resultados mostrados na FIGURA 53, observa-se, curiosamente, que a coagulação/flotação, por si própria, foi a responsável pela quase totalidade da parcela da concentração de coliformes removida. O residual de coliformes totais observado no ensaio de FAD sem a pré-ozonização situou-se na faixa de  $1,5 \times 10^4$  NMP/100 ml para concentração inicial de  $7,4 \times 10^7$  NMP/100 ml.

Uma explicação possível para os inusitados valores resultantes de remoção de coliformes totais e fecais após a ozonização, deve-se à existência de elevada concentração de sólidos em suspensão no efluente coagulado, os quais exercem uma ação de “proteção” à parcela considerável de microrganismos frente à ação do ozônio, uma vez que estes podem se “abrigar” no interior das partículas suspensas.

Uma justificativa complementar para os resultados encontrados é a de não haver residual de ozônio na água de estudo, após a sua aplicação na coluna de contato, permitindo que as bactérias remanescentes permaneçam ativas no sistema.

Dessa forma, pode-se dizer que a pré-ozonização (antecedendo a coagulação/floculação e flotação por ar dissolvido) não se apresentou suficientemente eficaz na remoção de coliformes, ao contrário do que “a priori” poder-se-ia imaginar. Portanto, torna-se evidente a necessidade de se submeter o efluente pós-tratado a um sistema de desinfecção final com ozônio ou outro agente desinfetante, ou seja, após a remoção de sólidos suspensos promovida pela flotação.



## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1. Conclusões

Com base nos resultados obtidos durante a realização dos ensaios referentes a todas as etapas de estudo do presente trabalho, é possível concluir que:

- ✦ O sistema envolvendo o emprego de reatores anaeróbios seguidos de ozonização, coagulação e flotação por ar dissolvido constitui-se em alternativa eficiente, capaz de promover elevado grau de tratamento de esgotos sanitários;
- ✦ Considerando-se as melhores condições de coagulação/flotação sem ozonização (dosagem de cloreto férrico igual a 65 mg/L e pH por volta de 5,5), a aplicação de 6 mg/L de ozônio, antecedendo a flotação, proporcionou aumento significativo das remoções de DQO (7,9 %), DBO (16,0 %), P total (5,3 %), cor aparente (9,8 %) e turbidez (7,1 %);
- ✦ No que se refere à remoção de nitrogênio total, o sistema não demonstrou eficácia (maior valor removido de NTK: 27,7 % nas condições de dosagem de ozônio nula, para ambas as dosagens de coagulante de 45 e 65 mg/L, com pH por volta de 5,5 e na situação em que a dosagem de ozônio era de 6 mg/L, com dosagem de cloreto férrico de 65 mg/L, sob condições de pH natural (ao redor de 6,5));

- ✦ O ozônio, atuando como auxiliar de flotação apresentou elevada eficiência, mesmo para velocidades de flotação (associadas à taxa de aplicação superficial) extremamente altas (360 m/dia), as quais alcançaram praticamente o mesmo nível de eficiência de remoção de parâmetros como DQO, P total, cor aparente e turbidez, que aquele obtido em se trabalhando com velocidades de flotação menores;
- ✦ Levando-se em conta as remoções de DQO, DBO, cor aparente e turbidez (excetuando-se o fosfato total), a aplicação de 6 mg/L de ozônio, antecedendo a coagulação/flotação permitiu a redução de dosagem de coagulante de 65 mg/L para 45 mg/L, com conseqüente diminuição na geração de lodo;
- ✦ A pré-ozonização seguida de coagulação/floculação e flotação por ar dissolvido não foi suficientemente eficiente como processo de desinfecção final do efluente, apresentando residual de coliformes totais de  $2,2 \times 10^4$  NMP/100 ml e de coliformes fecais de  $3,1 \times 10^3$  NMP/100 ml, nas melhores condições de ensaio.
- ✦ O método iodométrico mostrou-se satisfatório para a determinação da produção de ozônio pelo aparelho gerador utilizado, bem como para a medição do residual de ozônio na água de estudo que, no caso, foi considerado inexistente.



## 6.2. Recomendações

As recomendações sugeridas para estudos posteriores são:

- ✦ Pesquisar a utilização, em uma mesma unidade, da flotação por ar dissolvido conjuntamente à aplicação do oxidante ozônio. Desse modo, num único sistema de pós-tratamento, promover-se-ia a oxidação química, a desinfecção e o polimento final do efluente do reator anaeróbio;
- ✦ Investigar o emprego do método índigo colorimétrico para determinações de residuais de ozônio na água de estudo.

## **ANEXO 1**

**Dados completos referentes à primeira etapa de ensaios**



## Dosagem de Ozônio Aplicada = 0 mg/L

### ① Características do efluente do reator anaeróbio: (Água Tipo A)

- ↘ Temperatura =  $25 \pm 2$  (°C)
- ↘ pH = 6,7
- ↘ Turbidez = 80,0 – 86,0 (uT)
- ↘ Cor Aparente = 710,0 – 720,0 (uPtCo)
- ↘ DQO = 239,4 (mg/L)
- ↘ P total = 20,6 (mg/L)
- ↘ Fe = 0,44 (mg/L)
- ↘ Mn = 0 (mg/L)

### ② Características do afluente do reator anaeróbio:

- ↘ Temperatura =  $25 \pm 2$  (°C)
- ↘ pH = 6,6
- ↘ Turbidez = 218,0 – 230,0 (uT)
- ↘ Cor Aparente = 1227,0 – 1165,0 (uPtCo)
- ↘ DQO = 563,0 (mg/L)
- ↘ P total = 21,4 (mg/L)
- ↘ Fe = 0,62 (mg/L)
- ↘ Mn = 0 (mg/L)

D <sub>FeCl3</sub> (mg/L)	pH	D <sub>CaI</sub> (mg/L)	D <sub>HCl 1%</sub> (mL/L)	Turbidez (uT)	T/T <sub>O</sub>	Rem. (%)	Cor Ap. (uPtCo)	C/C <sub>O</sub>	Rem. (%)	Veloc. (cm/min)	
0,0	6,7	0,0	0,0	70,0	0,81	18,6	585,8	0,81	18,6	25,0	
				71,0	0,83	17,4	555,5	0,77	22,8	20,0	
				73,4	0,85	14,7	530,8	0,74	26,3	16,0	
				69,5	0,81	19,2	525,8	0,73	27,0	12,0	
				67,2	0,78	21,9	533,5	0,74	25,9	6,0	
30,0	6,4	0,0	0,0	95,4	1,11	-10,9	678,7	0,94	5,7	25,0	
				86,7	1,01	-0,8	621,5	0,86	13,7	20,0	
				72,2	0,84	16,0	621,5	0,86	13,7	16,0	
				53,8	0,63	37,4	478,5	0,66	33,5	12,0	
				43,1	0,50	49,9	447,7	0,62	37,8	6,0	
	6,7	50,0	0,0	0,0	58,3	0,68	32,2	506,0	0,70	29,7	25,0
					47,7	0,55	44,5	440,0	0,61	38,9	20,0
					41,0	0,48	52,3	381,7	0,53	47,0	16,0
					39,1	0,45	54,5	396,0	0,55	45,0	12,0
					32,5	0,38	62,2	367,4	0,51	49,0	6,0
	7,5	120,0	0,0	0,0	63,6	0,74	26,0	376,8	0,52	47,7	25,0
					39,8	0,46	53,7	345,4	0,48	52,0	20,0
					28,9	0,34	66,4	304,7	0,42	57,7	16,0
					25,0	0,29	70,9	299,2	0,42	58,4	12,0
					19,8	0,23	77,0	280,5	0,39	61,0	6,0
	45,0	6,2	0,0	0,0	113,3	1,32	-31,7	745,3	1,04	-3,5	25,0
99,2					1,15	-15,3	723,3	1,00	-0,5	20,0	
45,7					0,53	46,9	423,5	0,59	41,2	16,0	
32,9					0,38	61,7	350,9	0,49	51,3	12,0	
39,2					0,46	54,4	356,4	0,50	50,5	6,0	
6,4		20,0	0,0	0,0	113,2	1,32	-31,6	668,3	0,93	7,2	25,0
					61,3	0,71	28,7	530,8	0,74	26,3	20,0
					45,2	0,53	47,4	404,8	0,56	43,8	16,0
					36,6	0,43	57,4	348,7	0,48	51,6	12,0
					31,9	0,37	62,9	323,4	0,45	55,1	6,0
6,8		100,0	0,0	0,0	59,5	0,69	30,8	448,3	0,62	37,7	25,0
					39,9	0,46	53,6	347,6	0,48	51,7	20,0
					33,9	0,39	60,6	317,9	0,44	55,8	16,0
					31,2	0,36	63,7	298,1	0,41	58,6	12,0
					25,5	0,30	70,3	292,6	0,41	59,4	6,0
65,0		6,0	0,0	0,0	89,2	1,04	-3,7	624,3	0,87	13,3	25,0
	61,5				0,72	28,5	407,0	0,57	43,5	20,0	
	66,0				0,77	23,3	308,0	0,43	57,2	16,0	
	29,2				0,34	66,0	293,7	0,41	59,2	12,0	
	24,9				0,29	71,0	283,8	0,39	60,6	6,0	
	5,6	0,0	11,1	11,1	85,7	1,00	0,3	673,8	0,94	6,4	25,0
					56,8	0,66	34,0	236,5	0,33	67,2	20,0
					35,5	0,41	58,7	228,3	0,32	68,3	16,0
					21,2	0,25	75,3	136,4	0,19	81,1	12,0
					11,9	0,14	86,2	124,3	0,17	82,7	6,0
	4,8	0,0	22,2	22,2	19,1	0,22	77,8	101,2	0,14	85,9	25,0
					14,4	0,17	83,3	110,0	0,15	84,7	20,0
					13,0	0,15	84,9	114,4	0,16	84,1	16,0
					3,9	0,05	95,5	52,8	0,07	92,7	12,0
					3,1	0,04	96,4	48,4	0,07	93,3	6,0

FIGURA 54 - Dosagem de ozônio aplicada = 0 mg/L (Água Tipo A)



D <sub>FeCl3</sub> (mg/L)	pH	D <sub>CaI</sub> (mg/L)	D <sub>HCl</sub> 1% (mL/L)	DQO (mg/L)	DQO/DQO <sub>0</sub>	Rem. (%)	P (mg/L)	P/P <sub>0</sub>	Rem. (%)	Veloc. (cm/min)	
0,0	6,7	0,0	0,0	176,0	0,74	26,5	17,1	0,83	17,0	25,0	
				199,3	0,83	16,8	17,2	0,83	16,5	20,0	
				190,5	0,80	20,4	17,8	0,86	13,6	16,0	
				167,2	0,70	30,2	18,0	0,87	12,6	12,0	
				181,8	0,76	24,1	17,9	0,87	13,1	6,0	
30,0	6,4	0,0	0,0	187,7	0,78	21,6	16,4	0,80	20,4	25,0	
				193,5	0,81	19,2	17,5	0,85	15,0	20,0	
				176,0	0,74	26,5	15,5	0,75	24,8	16,0	
				155,5	0,65	35,0	14,3	0,69	30,6	12,0	
				141,0	0,59	41,1	12,4	0,60	39,8	6,0	
	6,7	50,0	0,0	0,0	135,2	0,56	43,5	12,7	0,62	38,3	25,0
					143,9	0,60	39,9	10,9	0,53	47,1	20,0
					123,5	0,52	48,4	10,1	0,49	51,0	16,0
					155,5	0,65	35,0	9,4	0,46	54,4	12,0
					120,7	0,50	49,6	9,5	0,46	53,9	6,0
	7,5	120,0	0,0	0,0	132,3	0,55	44,7	10,6	0,51	48,5	25,0
					117,7	0,49	50,8	9,6	0,47	53,4	20,0
					117,7	0,49	50,8	8,7	0,42	57,8	16,0
					111,9	0,47	53,3	9,1	0,44	55,8	12,0
					117,7	0,49	50,8	11,1	0,54	46,1	6,0
45,0	6,2	0,0	0,0	202,2	0,84	15,5	19,4	0,94	5,8	25,0	
				196,4	0,82	18,0	18,6	0,90	9,7	20,0	
				135,2	0,56	43,5	11,2	0,54	45,6	16,0	
				129,4	0,54	45,9	10,6	0,51	48,5	12,0	
				138,2	0,58	42,3	9,5	0,46	53,9	6,0	
	6,4	20,0	0,0	0,0	184,7	0,77	22,8	16,3	0,79	20,9	25,0
					164,3	0,69	31,4	14,5	0,70	29,6	20,0
					135,2	0,56	43,5	11,1	0,54	46,1	16,0
					129,4	0,54	45,9	8,9	0,43	56,8	12,0
					117,7	0,49	50,8	8,6	0,42	58,3	6,0
	6,8	100,0	0,0	0,0	129,0	0,54	46,1	10,7	0,52	48,1	25,0
					129,0	0,54	46,1	8,6	0,42	58,3	20,0
					129,0	0,54	46,1	7,4	0,36	64,1	16,0
					103,2	0,43	56,9	6,9	0,33	66,5	12,0
					108,9	0,45	54,5	8,4	0,41	59,2	6,0
65,0	6,0	0,0	0,0	176,0	0,74	26,5	16,4	0,80	20,4	25,0	
				138,2	0,58	42,3	9,8	0,48	52,4	20,0	
				138,2	0,58	42,3	7,6	0,37	63,1	16,0	
				100,2	0,42	58,1	5,8	0,28	71,8	12,0	
				109,0	0,46	54,5	5,9	0,29	71,4	6,0	
	5,6	0,0	11,1	0,0	199,3	0,83	16,8	18,5	0,90	10,2	25,0
					155,5	0,65	35,0	10,0	0,49	51,5	20,0
					109,0	0,46	54,5	7,2	0,35	65,0	16,0
					94,4	0,39	60,6	6,6	0,32	68,0	12,0
					82,7	0,35	65,5	4,0	0,19	80,6	6,0
	4,8	0,0	22,2	0,0	100,2	0,42	58,1	4,8	0,23	76,7	25,0
					71,1	0,30	70,3	4,5	0,22	78,2	20,0
					88,6	0,37	63,0	5,8	0,28	71,8	16,0
					68,2	0,28	71,5	2,6	0,13	87,4	12,0
					74,0	0,31	69,1	2,4	0,12	88,3	6,0

FIGURA 54 - Continuação



D <sub>FeCl3</sub> (mg/L)	pH	D <sub>CaI</sub> (mg/L)	D <sub>HCl 1%</sub> (mL/L)	Fe (mg/L)	Fe/Fe <sub>0</sub>	Mn (mg/L)	Veloc. (cm/min)	
0,0	6,7	0,0	0,0	0,55	1,25	0,00	25,0	
				0,72	1,64	0,00	20,0	
				0,46	1,05	0,00	16,0	
				0,39	0,89	0,04	12,0	
				0,37	0,84	0,02	6,0	
30,0	6,4	0,0	0,0	7,91	17,98	0,09	25,0	
				7,90	17,95	0,08	20,0	
				6,79	15,43	0,12	16,0	
				5,19	11,80	0,01	12,0	
				5,05	11,48	0,00	6,0	
	6,7	50,0	0,0	0,0	4,57	10,39	0,00	25,0
					3,51	7,98	0,01	20,0
					2,64	6,00	0,00	16,0
					2,46	5,59	0,61	12,0
					1,69	3,84	0,00	6,0
	7,5	120,0	0,0	0,0	3,43	7,80	0,00	25,0
					2,33	5,30	11,00	20,0
					1,63	3,70	23,30	16,0
					1,45	3,30	0,22	12,0
					1,29	2,93	0,00	6,0
45,0	6,2	0,0	0,0	14,63	33,25	0,00	25,0	
				14,52	33,00	0,00	20,0	
				5,56	12,64	0,00	16,0	
				3,77	8,57	0,00	12,0	
				4,07	9,25	0,00	6,0	
	6,4	20,0	0,0	0,0	11,55	26,25	0,00	25,0
					8,25	18,75	0,00	20,0
					5,31	12,07	0,00	16,0
					3,44	7,82	0,00	12,0
					3,12	7,09	0,00	6,0
	6,8	100,0	0,0	0,0	5,61	12,75	0,00	25,0
					2,66	6,05	0,00	20,0
					2,27	5,16	0,00	16,0
					1,34	3,05	0,00	12,0
					1,23	2,80	0,00	6,0
65,0	6,0	0,0	0,0	18,48	42,00	0,00	25,0	
				9,83	22,34	0,00	20,0	
				6,86	15,59	0,00	16,0	
				5,96	13,55	0,00	12,0	
				5,52	12,55	0,00	6,0	
	5,6	0,0	11,1	11,1	22,00	50,00	0,00	25,0
					8,45	19,20	0,00	20,0
					7,27	16,52	0,00	16,0
					4,21	9,57	0,00	12,0
					3,59	8,16	0,00	6,0
	4,8	0,0	22,2	22,2	4,25	9,66	0,00	25,0
					5,04	11,45	0,00	20,0
					5,15	11,70	0,00	16,0
					3,03	6,89	0,00	12,0
					3,22	7,32	0,00	6,0

FIGURA 54 - Continuação



## Dosagem de Ozônio Aplicada = 3 mg/L

### ① Características do efluente do reator anaeróbio: (Água Tipo B)

- ↘ Temperatura =  $25 \pm 2$  (°C)
- ↘ pH = 7,1
- ↘ Turbidez = 98,0 – 119,0 (uT)
- ↘ Cor Aparente = 722,5 – 762,5 (uPtCo)
- ↘ DQO = 294,0 (mg/L)
- ↘ P total = 21,9 (mg/L)
- ↘ Fe = 1,63 (mg/L)
- ↘ Mn = 0,02 (mg/L)

### ② Características do afluente do reator anaeróbio:

- ↘ Temperatura =  $25 \pm 2$  (°C)
- ↘ pH = 7,0
- ↘ Turbidez = 235,0 – 245,0 (uT)
- ↘ Cor Aparente = 1120,0 – 1125,0 (uPtCo)
- ↘ DQO = 573,0 (mg/L)
- ↘ P total = 22,3 (mg/L)
- ↘ Fe = 1,74 (mg/L)
- ↘ Mn = 0 (mg/L)

D <sub>FeCl3</sub> (mg/L)	pH	D <sub>CaI</sub> (mg/L)	D <sub>HCl</sub> 1% (mL/L)	Turbidez (uT)	T/T <sub>0</sub>	Rem. (%)	Cor Ap. (uPtCo)	C/C <sub>0</sub>	Rem. (%)	Veloc. (cm/min)	
0,0	7,0	0,0	0,0	107,8	0,91	9,4	393,3	0,52	48,4	25,0	
				90,1	0,76	24,3	393,3	0,52	48,4	20,0	
				91,4	0,77	23,2	431,8	0,57	43,4	16,0	
				84,3	0,71	29,2	387,8	0,51	49,1	12,0	
				80,5	0,68	32,4	368,5	0,48	51,7	6,0	
30,0	6,7	0,0	0,0	116,6	0,98	2,0	649,0	0,85	14,9	25,0	
				67,4	0,57	43,4	462,0	0,61	39,4	20,0	
				55,1	0,46	53,7	398,8	0,52	47,7	16,0	
				46,3	0,39	61,1	327,3	0,43	57,1	12,0	
				41,5	0,35	65,1	324,5	0,43	57,4	6,0	
	7,0	40,0	0,0	0,0	78,9	0,66	33,7	360,3	0,47	52,7	25,0
					39,4	0,33	66,9	269,5	0,35	64,7	20,0
					37,2	0,31	68,7	281,6	0,37	63,1	16,0
					32,5	0,27	72,7	275,0	0,36	63,9	12,0
					32,3	0,27	72,9	275,0	0,36	63,9	6,0
	7,7	110,0	0,0	0,0	83,4	0,70	29,9	244,8	0,32	67,9	25,0
					27,4	0,23	77,0	222,8	0,29	70,8	20,0
					24,5	0,21	79,4	239,3	0,31	68,6	16,0
					19,3	0,16	83,8	181,5	0,24	76,2	12,0
					17,2	0,14	85,5	200,8	0,26	73,7	6,0
45,0	6,5	0,0	0,0	148,5	1,25	-24,8	673,8	0,88	11,6	25,0	
				92,5	0,78	22,3	442,8	0,58	41,9	20,0	
				43,6	0,37	63,4	346,5	0,45	54,6	16,0	
				36,5	0,31	69,3	349,3	0,46	54,2	12,0	
				28,2	0,24	76,3	264,0	0,35	65,4	6,0	
	6,1	10,0	0,0	0,0	205,7	1,73	-72,9	786,5	1,03	-3,1	25,0
					115,5	0,97	2,9	517,0	0,68	32,2	20,0
					50,6	0,43	57,5	385,0	0,50	49,5	16,0
					33,1	0,28	72,2	305,3	0,40	60,0	12,0
					27,9	0,23	76,6	294,3	0,39	61,4	6,0
	7,2	90,0	0,0	0,0	58,3	0,49	51,0	316,3	0,41	58,5	25,0
					31,4	0,26	73,6	261,3	0,34	65,7	20,0
					24,8	0,21	79,2	247,5	0,32	67,5	16,0
					21,8	0,18	81,7	233,8	0,31	69,3	12,0
					19,5	0,16	83,6	242,0	0,32	68,3	6,0
65,0	6,3	0,0	0,0	162,8	1,37	-36,8	808,5	1,06	-6,0	25,0	
				192,5	1,62	-61,8	728,8	0,96	4,4	20,0	
				47,5	0,40	60,1	316,3	0,41	58,5	16,0	
				28,7	0,24	75,9	236,5	0,31	69,0	12,0	
				24,8	0,21	79,2	209,0	0,27	72,6	6,0	
	5,7	0,0	8,3	0,0	139,7	1,17	-17,4	808,5	1,06	-6,0	25,0
					96,0	0,81	19,3	434,5	0,57	43,0	20,0
					38,4	0,32	67,7	225,5	0,30	70,4	16,0
					25,0	0,21	79,0	187,0	0,25	75,5	12,0
					14,0	0,12	88,2	176,0	0,23	76,9	6,0
	5,2	0,0	16,7	0,0	110,0	0,92	7,6	770,0	1,01	-1,0	25,0
					42,7	0,36	64,1	291,5	0,38	61,8	20,0
					10,6	0,09	91,1	129,3	0,17	83,0	16,0
					3,9	0,03	96,7	77,0	0,10	89,9	12,0
					2,9	0,02	97,6	55,0	0,07	92,8	6,0

FIGURA 55 - Dosagem de ozônio aplicada = 3 mg/L (Água Tipo B)



D <sub>FeCl3</sub> (mg/L)	pH	D <sub>CaI</sub> (mg/L)	D <sub>HCl</sub> 1% (mL/L)	DQO (mg/L)	DQO/DQO <sub>0</sub>	Rem. (%)	P (mg/L)	P/P <sub>0</sub>	Rem. (%)	Veloc. (cm/min)	
0,0	7,0	0,0	0,0	152,7	0,52	48,1	20,6	0,94	5,9	25,0	
				149,7	0,51	49,1	21,2	0,97	3,2	20,0	
				155,5	0,53	47,1	22,2	1,01	-1,4	16,0	
				138,2	0,47	53,0	21,5	0,98	1,8	12,0	
				143,9	0,49	51,1	20,9	0,95	4,6	6,0	
30,0	6,7	0,0	0,0	184,7	0,63	37,2	13,9	0,63	36,5	25,0	
				132,3	0,45	55,0	15,7	0,72	28,3	20,0	
				117,7	0,40	60,0	14,4	0,66	34,2	16,0	
				114,8	0,39	61,0	12,9	0,59	41,1	12,0	
				123,5	0,42	58,0	13,6	0,62	37,9	6,0	
	7,0	40,0	0,0	0,0	103,2	0,35	64,9	14,3	0,65	34,7	25,0
					114,8	0,39	61,0	12,9	0,59	41,1	20,0
					103,2	0,35	64,9	12,4	0,57	43,4	16,0
					94,4	0,32	67,9	12,3	0,56	43,8	12,0
					94,4	0,32	67,9	12,2	0,56	44,3	6,0
	7,7	110,0	0,0	0,0	100,2	0,34	65,9	12,7	0,58	42,0	25,0
					91,5	0,31	68,9	12,5	0,57	42,9	20,0
					85,7	0,29	70,9	11,9	0,54	45,7	16,0
					62,4	0,21	78,8	11,8	0,54	46,1	12,0
					85,7	0,29	70,9	9,4	0,43	57,1	6,0
45,0	6,5	0,0	0,0	190,5	0,65	35,2	22,3	1,02	-1,8	25,0	
				143,9	0,49	51,1	15,6	0,71	28,8	20,0	
				114,8	0,39	61,0	11,1	0,51	49,3	16,0	
				91,5	0,31	68,9	12,8	0,58	41,6	12,0	
				103,2	0,35	64,9	9,2	0,42	58,0	6,0	
	6,1	10,0	0,0	0,0	205,2	0,70	30,2	18,8	0,86	14,2	25,0
					152,7	0,52	48,1	16,2	0,74	26,0	20,0
					129,4	0,44	56,0	12,0	0,55	45,2	16,0
					109,0	0,37	62,9	9,8	0,45	55,3	12,0
					109,0	0,37	62,9	9,1	0,42	58,4	6,0
	7,2	90,0	0,0	0,0	100,2	0,34	65,9	11,6	0,53	47,0	25,0
					103,2	0,35	64,9	9,1	0,42	58,4	20,0
					94,4	0,32	67,9	8,3	0,38	62,1	16,0
					76,9	0,26	73,8	8,1	0,37	63,0	12,0
					103,2	0,35	64,9	8,0	0,37	63,5	6,0
65,0	6,3	0,0	0,0	208,0	0,71	29,3	19,9	0,91	9,1	25,0	
				205,2	0,70	30,2	18,6	0,85	15,1	20,0	
				135,2	0,46	54,0	8,1	0,37	63,0	16,0	
				103,2	0,35	64,9	5,6	0,26	74,4	12,0	
				111,9	0,38	61,9	5,3	0,24	75,8	6,0	
	5,7	0,0	8,3	8,3	213,8	0,73	27,3	21,6	0,99	1,4	25,0
					129,4	0,44	56,0	11,1	0,51	49,3	20,0
					100,2	0,34	65,9	7,6	0,35	65,3	16,0
					91,5	0,31	68,9	4,5	0,21	79,5	12,0
					82,7	0,28	71,9	3,6	0,16	83,6	6,0
	5,2	0,0	16,7	16,7	219,7	0,75	25,3	23,1	1,05	-5,5	25,0
					120,7	0,41	58,9	11,6	0,53	47,0	20,0
					135,2	0,46	54,0	4,1	0,19	81,3	16,0
					65,3	0,22	77,8	3,0	0,14	86,3	12,0
					97,4	0,33	66,9	2,4	0,11	89,0	6,0

FIGURA 55 - Continuação



D <sub>FeCl3</sub> (mg/L)	pH	D <sub>CaI</sub> (mg/L)	D <sub>HCl 1%</sub> (mL/L)	Fe (mg/L)	Fe/Fe <sub>0</sub>	Mn (mg/L)	Mn/Mn <sub>0</sub>	
0,0	7,0	0,0	0,0	0,64	0,39	0,01	0,50	
				0,46	0,28	0,04	2,00	
				0,24	0,15	0,02	1,00	
				0,15	0,09	0,03	1,50	
				0,50	0,31	0,06	3,00	
30,0	6,7	0,0	0,0	7,74	4,75	0,09	4,50	
				3,89	2,39	0,08	4,00	
				2,53	1,55	0,07	3,50	
				2,20	1,35	0,06	3,00	
				1,65	1,01	0,06	3,00	
	7,0	40,0	0,0	0,0	3,14	1,93	0,04	2,00
					1,49	0,91	0,04	2,00
					1,07	0,66	0,04	2,00
					0,89	0,55	0,03	1,50
					0,83	0,51	0,04	2,00
	7,7	110,0	0,0	0,0	2,13	1,31	0,04	2,00
					1,10	0,67	0,04	2,00
					0,99	0,61	0,04	2,00
					0,88	0,54	0,03	1,50
					0,55	0,34	0,04	2,00
45,0	6,5	0,0	0,0	17,60	10,80	0,06	3,00	
				7,04	4,32	0,02	1,00	
				3,96	2,43	0,02	1,00	
				2,37	1,45	0,03	1,50	
				1,72	1,06	0,03	1,50	
	6,1	10,0	0,0	0,0	21,45	13,16	0,06	3,00
					8,58	5,26	0,06	3,00
					4,48	2,75	0,04	2,00
					2,88	1,77	0,03	1,50
					2,12	1,30	0,03	1,50
	7,2	90,0	0,0	0,0	4,03	2,47	0,04	2,00
					1,71	1,05	0,02	1,00
					0,95	0,58	0,02	1,00
					0,83	0,51	0,02	1,00
					0,70	0,43	0,01	0,50
65,0	6,3	0,0	0,0	23,98	14,71	0,08	4,00	
				22,00	13,50	0,07	3,50	
				4,84	2,97	0,06	3,00	
				2,39	1,47	0,04	2,00	
				1,46	0,90	0,04	2,00	
	5,7	0,0	8,3	8,3	24,20	14,85	0,08	4,00
					8,97	5,50	0,06	3,00
					4,04	2,48	0,06	3,00
					2,23	1,37	0,06	3,00
					1,65	1,01	0,07	3,50
	5,2	0,0	16,7	16,7	28,05	17,21	0,08	4,00
					6,93	4,25	0,07	3,50
					2,05	1,26	0,07	3,50
					1,10	0,67	0,08	4,00
					0,79	0,48	0,08	4,00

FIGURA 55 - Continuação



## Dosagem de Ozônio Aplicada = 6 mg/L

### ① Características do efluente do reator anaeróbio: (Água Tipo C)

- ↘ Temperatura =  $25 \pm 2$  (°C)
- ↘ pH = 6,5
- ↘ Turbidez = 102,0 – 125,0 (uT)
- ↘ Cor Aparente = 650,0 – 654,0 (uPtCo)
- ↘ DQO = 272,0 (mg/L)
- ↘ P total = 20,6 (mg/L)
- ↘ Fe = 0,45 (mg/L)
- ↘ Mn = 0 (mg/L)

### ② Características do afluente do reator anaeróbio:

- ↘ Temperatura =  $25 \pm 2$  (°C)
- ↘ pH = 6,6
- ↘ Turbidez = 197,0 – 200,0 (uT)
- ↘ Cor Aparente = 1130,0 – 1110,0 (uPtCo)
- ↘ DQO = 461,0 (mg/L)
- ↘ P total = 21,0 (mg/L)
- ↘ Fe = 0,53 (mg/L)
- ↘ Mn = 0 (mg/L)

D <sub>FeCl3</sub> (mg/L)	pH	D <sub>CaI</sub> (mg/L)	D <sub>HCl 1%</sub> (mL/L)	Turbidez (uT)	T/T <sub>O</sub>	Rem. (%)	Cor Ap. (uPtCo)	C/C <sub>O</sub>	Rem. (%)	Veloc. (cm/min)	
0,0	7,3	0,0	0,0	113,3	0,91	9,4	519,8	0,80	20,0	25,0	
				104,1	0,83	16,7	508,8	0,78	21,7	20,0	
				99,2	0,79	20,6	459,3	0,71	29,3	16,0	
				95,2	0,76	23,8	486,8	0,75	25,1	12,0	
				90,1	0,72	27,9	533,5	0,82	17,9	6,0	
30,0	6,8	0,0	0,0	109,6	0,88	12,3	550,0	0,85	15,4	25,0	
				63,4	0,51	49,3	393,3	0,61	39,5	20,0	
				52,4	0,42	58,1	313,5	0,48	51,8	16,0	
				48,7	0,39	61,0	315,7	0,49	51,4	12,0	
				47,4	0,38	62,1	293,7	0,45	54,8	6,0	
	7,0	10,0	0,0	0,0	89,3	0,71	28,6	459,3	0,71	29,3	25,0
					54,8	0,44	56,2	338,3	0,52	48,0	20,0
					45,5	0,36	63,6	283,3	0,44	56,4	16,0
					40,7	0,33	67,4	283,3	0,44	56,4	12,0
					39,1	0,31	68,7	272,3	0,42	58,1	6,0
	7,3	30,0	0,0	0,0	64,9	0,52	48,1	387,8	0,60	40,3	25,0
					40,3	0,32	67,8	280,5	0,43	56,8	20,0
					36,3	0,29	71,0	261,3	0,40	59,8	16,0
					34,2	0,27	72,6	242,0	0,37	62,8	12,0
					32,2	0,26	74,2	242,0	0,37	62,8	6,0
45,0	6,6	0,0	0,0	111,1	0,89	11,1	530,8	0,82	18,3	25,0	
				46,0	0,37	63,2	324,5	0,50	50,1	20,0	
				33,2	0,27	73,4	244,8	0,38	62,3	16,0	
				27,7	0,22	77,8	211,8	0,33	67,4	12,0	
				24,4	0,20	80,5	222,8	0,34	65,7	6,0	
	6,2	0,0	5,6	0,0	81,0	0,65	35,2	335,5	0,52	48,4	25,0
					41,0	0,33	67,2	305,3	0,47	53,0	20,0
					34,3	0,27	72,6	225,5	0,35	65,3	16,0
					30,1	0,24	75,9	222,8	0,34	65,7	12,0
					26,5	0,21	78,8	211,8	0,33	67,4	6,0
	6,8	20,0	0,0	0,0	139,7	1,12	-11,8	489,5	0,75	24,7	25,0
					48,8	0,39	61,0	250,3	0,39	61,5	20,0
					34,3	0,27	72,6	244,8	0,38	62,3	16,0
					32,2	0,26	74,2	236,5	0,36	63,6	12,0
					30,4	0,24	75,7	211,8	0,33	67,4	6,0
65,0	6,2	0,0	0,0	193,6	1,55	-54,9	668,3	1,03	-2,8	25,0	
				41,7	0,33	66,6	275,0	0,42	57,7	20,0	
				28,1	0,22	77,5	228,3	0,35	64,9	16,0	
				23,8	0,19	81,0	178,8	0,28	72,5	12,0	
				21,7	0,17	82,6	181,5	0,28	72,1	6,0	
	5,4	0,0	16,7	0,0	28,9	0,23	76,9	140,3	0,22	78,4	25,0
					12,9	0,10	89,7	88,0	0,14	86,5	20,0
					6,0	0,05	95,2	52,3	0,08	92,0	16,0
					4,7	0,04	96,2	38,5	0,06	94,1	12,0
					3,0	0,02	97,6	27,5	0,04	95,8	6,0
	4,5	0,0	25,0	0,0	23,1	0,18	81,5	148,5	0,23	77,2	25,0
					22,0	0,18	82,4	145,8	0,22	77,6	20,0
					21,6	0,17	82,7	134,8	0,21	79,3	16,0
					21,8	0,17	82,6	140,3	0,22	78,4	12,0
					22,2	0,18	82,2	143,0	0,22	78,0	6,0

FIGURA 56 - Dosagem de ozônio aplicada = 6 mg/L (Água Tipo C)



D <sub>FeCl3</sub> (mg/L)	pH	D <sub>CaI</sub> (mg/L)	D <sub>HCl 1%</sub> (mL/L)	DQO (mg/L)	DQO/DQO <sub>o</sub>	Rem. (%)	P (mg/L)	P/P <sub>o</sub>	Rem. (%)	Veloc. (cm/min)	
0,0	7,3	0,0	0,0	178,9	0,66	34,2	21,5	1,04	-4,1	25,0	
				184,7	0,68	32,1	20,7	1,00	-0,4	20,0	
				205,2	0,75	24,6	23,1	1,12	-12,1	16,0	
				187,7	0,69	31,0	21,6	1,05	-4,7	12,0	
				173,0	0,64	36,4	21,2	1,03	-3,1	6,0	
30,0	6,8	0,0	0,0	178,9	0,66	34,2	17,1	0,83	17,2	25,0	
				135,2	0,50	50,3	14,3	0,69	30,6	20,0	
				126,5	0,47	53,5	13,0	0,63	37,0	16,0	
				123,5	0,45	54,6	12,7	0,61	38,6	12,0	
				135,2	0,50	50,3	12,5	0,61	39,1	6,0	
	7,0	10,0	0,0	0,0	143,9	0,53	47,1	15,2	0,74	26,3	25,0
					129,4	0,48	52,4	12,9	0,62	37,5	20,0
					114,8	0,42	57,8	12,4	0,60	39,7	16,0
					126,4	0,46	53,5	12,0	0,58	41,8	12,0
					109,0	0,40	59,9	12,8	0,62	38,1	6,0
	7,3	30,0	0,0	0,0	141,0	0,52	48,2	14,5	0,70	29,5	25,0
					114,8	0,42	57,8	12,0	0,58	41,8	20,0
					103,2	0,38	62,1	11,8	0,57	42,9	16,0
					114,8	0,42	57,8	12,5	0,61	39,1	12,0
					114,8	0,42	57,8	11,2	0,54	45,5	6,0
45,0	6,6	0,0	0,0	167,2	0,61	38,5	15,8	0,77	23,1	25,0	
				123,5	0,45	54,6	11,6	0,56	43,9	20,0	
				106,0	0,39	61,0	10,6	0,51	48,7	16,0	
				106,0	0,39	61,0	8,6	0,42	58,3	12,0	
				117,7	0,43	56,7	7,6	0,37	63,2	6,0	
	6,2	0,0	5,6	5,6	143,9	0,53	47,1	13,4	0,65	34,9	25,0
					120,7	0,44	55,6	11,2	0,54	45,5	20,0
					114,8	0,42	57,8	9,9	0,48	51,9	16,0
					114,8	0,42	57,8	8,9	0,43	56,7	12,0
					106,0	0,39	61,0	9,4	0,45	54,6	6,0
	6,8	20,0	0,0	0,0	257,5	0,95	5,3	14,7	0,72	28,4	25,0
					123,5	0,45	54,6	9,1	0,44	55,7	20,0
					109,0	0,40	59,9	8,1	0,40	60,5	16,0
					120,7	0,44	55,6	7,4	0,36	64,2	12,0
					106,0	0,39	61,0	7,2	0,35	65,3	6,0
65,0	6,2	0,0	0,0	211,0	0,78	22,4	17,6	0,85	14,6	25,0	
				111,9	0,41	58,9	8,4	0,41	59,4	20,0	
				117,7	0,43	56,7	5,5	0,27	73,3	16,0	
				103,2	0,38	62,1	5,1	0,25	75,4	12,0	
				97,4	0,36	64,2	4,5	0,22	78,1	6,0	
	5,4	0,0	16,7	16,7	76,9	0,28	71,7	5,0	0,24	76,0	25,0
					88,6	0,33	67,4	4,7	0,23	77,0	20,0
					88,6	0,33	67,4	3,5	0,17	82,9	16,0
					65,3	0,24	76,0	2,6	0,13	87,2	12,0
					68,2	0,25	74,9	2,2	0,11	89,3	6,0
	4,5	0,0	25,0	25,0	68,2	0,25	74,9	7,8	0,38	62,1	25,0
					74,0	0,27	72,8	9,2	0,45	55,1	20,0
					97,4	0,36	64,2	8,1	0,40	60,5	16,0
					79,9	0,29	70,6	8,1	0,40	60,5	12,0
					74,0	0,27	72,8	8,4	0,41	59,4	6,0

FIGURA 56 - Continuação



D <sub>FeCl3</sub> (mg/L)	pH	D <sub>CaI</sub> (mg/L)	D <sub>HCl 1%</sub> (mL/L)	Fe (mg/L)	Fe/Fe <sub>0</sub>	Mn (mg/L)	Veloc. (cm/min)	
0,0	7,3	0,0	0,0	0,43	0,96	0,00	25,0	
				0,40	0,89	0,00	20,0	
				0,34	0,76	0,00	16,0	
				0,34	0,76	0,00	12,0	
				0,33	0,73	0,00	6,0	
30,0	6,8	0,0	0,0	5,28	11,73	0,00	25,0	
				2,61	5,80	0,00	20,0	
				1,96	4,36	0,00	16,0	
				1,63	3,62	0,00	12,0	
				1,44	3,20	0,00	6,0	
	7,0	10,0	0,0	0,0	4,47	9,93	0,00	25,0
					2,50	5,56	0,00	20,0
					1,76	3,91	0,00	16,0
					1,45	3,22	0,00	12,0
					1,24	2,76	0,00	6,0
	7,3	30,0	0,0	0,0	3,63	8,07	0,00	25,0
					1,85	4,11	0,00	20,0
					1,52	3,38	0,00	16,0
					1,28	2,84	0,00	12,0
					1,08	2,40	0,00	6,0
45,0	6,6	0,0	0,0	8,75	19,44	0,00	25,0	
				4,31	9,58	0,00	20,0	
				2,73	6,07	0,00	16,0	
				2,01	4,47	0,00	12,0	
				1,78	3,96	0,00	6,0	
	6,2	0,0	5,6	5,6	6,22	13,82	0,00	25,0
					4,27	9,49	0,00	20,0
					3,47	7,71	0,00	16,0
					2,97	6,60	0,00	12,0
					2,68	5,96	0,00	6,0
	6,8	20,0	0,0	0,0	8,42	18,71	0,00	25,0
					2,74	6,09	0,00	20,0
					1,78	3,96	0,00	16,0
					1,36	3,02	0,00	12,0
					1,10	2,44	0,00	6,0
65,0	6,2	0,0	0,0	18,70	41,56	0,00	25,0	
				5,72	12,71	0,00	20,0	
				3,03	6,73	0,00	16,0	
				2,09	4,64	0,00	12,0	
				1,65	3,67	0,00	6,0	
	5,4	0,0	16,7	16,7	3,74	8,31	0,00	25,0
					2,60	5,78	0,00	20,0
					1,29	2,87	0,00	16,0
					1,09	2,42	0,00	12,0
					0,53	1,18	0,00	6,0
	4,5	0,0	25,0	25,0	9,13	20,29	0,00	25,0
					8,80	19,56	0,00	20,0
					8,42	18,71	0,00	16,0
					8,80	19,56	0,00	12,0
					9,13	20,29	0,00	6,0

FIGURA 56 - Continuação



## Dosagem de Ozônio Aplicada = 9 mg/L

### ① Características do efluente do reator anaeróbio: (Água Tipo D)

- ↘ Temperatura =  $25 \pm 2$  (°C)
- ↘ pH = 6,5
- ↘ Turbidez = 76,8 – 80,0 (uT)
- ↘ Cor Aparente = 745,0 – 762,5 (uPtCo)
- ↘ DQO = 251,0 (mg/L)
- ↘ P total = 15,2 (mg/L)
- ↘ Fe = 0,39 (mg/L)
- ↘ Mn = 0 (mg/L)

### ② Características do afluente do reator anaeróbio:

- ↘ Temperatura =  $25 \pm 2$  (°C)
- ↘ pH = 6,6
- ↘ Turbidez = 240,0 – 258,0 (uT)
- ↘ Cor Aparente = 1220,0 – 1325,0 (uPtCo)
- ↘ DQO = 665,0 (mg/L)
- ↘ P total = 21,8 (mg/L)
- ↘ Fe = 0,70 (mg/L)
- ↘ Mn = 0 (mg/L)

D <sub>FeCl3</sub> (mg/L)	pH	D <sub>CaI</sub> (mg/L)	D <sub>HCl</sub> 1% (mL/L)	Turbidez (uT)	T/T <sub>O</sub>	Rem. (%)	Cor Ap. (uPtCo)	C/C <sub>O</sub>	Rem. (%)	Veloc. (cm/min)	
0,0	7,3	0,0	0,0	56,2	0,70	29,8	283,3	0,37	62,9	25,0	
				56,2	0,70	29,8	385,0	0,50	49,5	20,0	
				52,9	0,66	33,9	473,0	0,62	38,0	16,0	
				49,3	0,62	38,4	412,5	0,54	45,9	12,0	
				46,2	0,58	42,3	437,3	0,57	42,7	6,0	
30,0	6,7	0,0	0,0	39,2	0,49	51,0	319,0	0,42	58,2	25,0	
				29,5	0,37	63,1	368,5	0,48	51,7	20,0	
				26,2	0,33	67,3	330,0	0,43	56,7	16,0	
				24,8	0,31	69,0	305,3	0,40	60,0	12,0	
				23,4	0,29	70,8	327,3	0,43	57,1	6,0	
	7,0	20,0	0,0	0,0	21,7	0,27	72,9	209,0	0,27	72,6	25,0
					17,8	0,22	77,8	225,5	0,30	70,4	20,0
					16,4	0,21	79,5	225,5	0,30	70,4	16,0
					15,4	0,19	80,8	269,5	0,35	64,7	12,0
					15,2	0,19	81,0	266,8	0,35	65,0	6,0
	7,6	50,0	0,0	0,0	16,5	0,21	79,4	173,3	0,23	77,3	25,0
					15,3	0,19	80,9	239,3	0,31	68,6	20,0
					13,5	0,17	83,1	203,5	0,27	73,3	16,0
					13,2	0,17	83,5	209,0	0,27	72,6	12,0
					12,8	0,16	84,0	225,5	0,30	70,4	6,0
45,0	6,4	0,0	0,0	17,9	0,22	77,6	233,8	0,31	69,3	25,0	
				14,5	0,18	81,9	206,3	0,27	73,0	20,0	
				13,4	0,17	83,3	242,0	0,32	68,3	16,0	
				12,8	0,16	84,0	214,5	0,28	71,9	12,0	
				12,5	0,16	84,4	211,8	0,28	72,2	6,0	
	6,1	0,0	2,8	0,0	35,8	0,45	55,3	371,3	0,49	51,3	25,0
					23,7	0,30	70,4	280,5	0,37	63,2	20,0
					15,6	0,20	80,5	247,5	0,32	67,5	16,0
					13,3	0,17	83,4	236,5	0,31	69,0	12,0
					12,3	0,15	84,6	214,5	0,28	71,9	6,0
	7,1	40,0	0,0	0,0	13,8	0,17	82,8	203,5	0,27	73,3	25,0
					11,6	0,15	85,5	198,0	0,26	74,0	20,0
					11,2	0,14	86,0	195,3	0,26	74,4	16,0
					10,6	0,13	86,8	203,5	0,27	73,3	12,0
					10,2	0,13	87,3	236,5	0,31	69,0	6,0
65,0	6,1	0,0	0,0	15,7	0,20	80,4	231,0	0,30	69,7	25,0	
				9,9	0,12	87,6	154,0	0,20	79,8	20,0	
				7,4	0,09	90,8	143,0	0,19	81,2	16,0	
				6,3	0,08	92,1	126,5	0,17	83,4	12,0	
				6,1	0,08	92,4	121,0	0,16	84,1	6,0	
	5,7	0,0	5,6	0,0	7,3	0,09	90,9	118,3	0,16	84,5	25,0
					6,3	0,08	92,1	107,3	0,14	85,9	20,0
					3,8	0,05	95,3	68,8	0,09	91,0	16,0
					2,4	0,03	97,0	60,5	0,08	92,1	12,0
					1,9	0,02	97,6	60,5	0,08	92,1	6,0
	4,7	0,0	13,9	0,0	3,6	0,05	95,5	41,3	0,05	94,6	25,0
					2,6	0,03	96,8	35,8	0,05	95,3	20,0
					1,9	0,02	97,6	30,3	0,04	96,0	16,0
					1,2	0,02	98,5	30,3	0,04	96,0	12,0
					1,0	0,01	98,8	27,5	0,04	96,4	6,0

FIGURA 57 - Dosagem de ozônio aplicada = 9 mg/L (Água Tipo D)



D <sub>FeCl3</sub> (mg/L)	pH	D <sub>CaI</sub> (mg/L)	D <sub>HCl 1%</sub> (mL/L)	DQO (mg/L)	DQO/DQO <sub>0</sub>	Rem. (%)	P (mg/L)	P/P <sub>0</sub>	Rem. (%)	Veloc. (cm/min)	
0,0	7,3	0,0	0,0	135,2	0,54	46,1	13,9	0,91	8,8	25,0	
				141,0	0,56	43,8	12,9	0,85	15,3	20,0	
				126,5	0,50	49,6	12,7	0,83	16,8	16,0	
				126,5	0,50	49,6	13,1	0,86	13,9	12,0	
				117,7	0,47	53,1	12,4	0,82	18,2	6,0	
30,0	6,7	0,0	0,0	109,0	0,43	56,6	10,1	0,67	33,4	25,0	
				82,7	0,33	67,0	9,0	0,59	40,7	20,0	
				85,7	0,34	65,9	8,5	0,56	44,3	16,0	
				111,9	0,45	55,4	8,0	0,53	47,2	12,0	
				91,5	0,36	63,5	7,8	0,51	48,6	6,0	
	7,0	20,0	0,0	0,0	68,2	0,27	72,8	6,9	0,46	54,4	25,0
					71,1	0,28	71,7	5,4	0,35	64,5	20,0
					65,3	0,26	74,0	5,1	0,33	66,7	16,0
					62,4	0,25	75,2	5,2	0,34	66,0	12,0
	7,6	50,0	0,0	0,0	68,2	0,27	72,8	4,7	0,31	68,9	6,0
					88,6	0,35	64,7	5,6	0,37	63,1	25,0
					68,2	0,27	72,8	5,5	0,36	63,8	20,0
					62,4	0,25	75,2	5,3	0,35	65,3	16,0
					88,6	0,35	64,7	5,2	0,34	66,0	12,0
					74,0	0,29	70,5	5,0	0,33	67,4	6,0
45,0	6,4	0,0	0,0	74,0	0,29	70,5	5,2	0,34	66,0	25,0	
				59,5	0,24	76,3	4,2	0,28	72,5	20,0	
				71,1	0,28	71,7	3,9	0,25	74,7	16,0	
				62,4	0,25	75,2	4,3	0,28	71,8	12,0	
				65,3	0,26	74,0	3,7	0,25	75,4	6,0	
	6,1	0,0	2,8	2,8	103,2	0,41	58,9	8,3	0,54	45,7	25,0
					111,9	0,45	55,4	6,5	0,43	57,3	20,0
					76,9	0,31	69,4	5,4	0,35	64,5	16,0
					71,1	0,28	71,7	5,0	0,33	67,4	12,0
					68,2	0,27	72,8	4,6	0,30	69,6	6,0
	7,1	40,0	0,0	0,0	68,2	0,27	72,8	2,8	0,18	81,9	25,0
					71,1	0,28	71,7	2,5	0,17	83,4	20,0
					65,3	0,26	74,0	2,6	0,17	82,6	16,0
					68,2	0,27	72,8	2,8	0,18	81,9	12,0
					74,0	0,29	70,5	2,1	0,14	86,3	6,0
65,0	6,1	0,0	0,0	76,9	0,31	69,4	3,9	0,25	74,7	25,0	
				62,4	0,25	75,2	3,1	0,20	79,7	20,0	
				74,0	0,29	70,5	1,7	0,11	89,1	16,0	
				56,5	0,23	77,5	2,1	0,14	86,3	12,0	
				62,4	0,25	75,2	1,2	0,08	92,0	6,0	
	5,7	0,0	5,6	5,6	59,5	0,24	76,3	1,8	0,12	88,4	25,0
					50,7	0,20	79,8	1,3	0,09	91,3	20,0
					50,7	0,20	79,8	0,6	0,04	96,4	16,0
					42,0	0,17	83,3	0,4	0,03	97,1	12,0
					44,9	0,18	82,1	0,3	0,02	97,8	6,0
					50,7	0,20	79,8	0,3	0,02	97,8	25,0
	4,7	0,0	13,9	13,9	30,4	0,12	87,9	0,0	0,00	100,0	20,0
					33,2	0,13	86,8	0,0	0,00	100,0	16,0
					36,2	0,14	85,6	0,0	0,00	100,0	12,0
					27,4	0,11	89,1	0,0	0,00	100,0	6,0
50,7					0,20	79,8	0,3	0,02	97,8	25,0	

FIGURA 57 - Continuação



D <sub>FeCl3</sub> (mg/L)	pH	D <sub>CaI</sub> (mg/L)	D <sub>HCl 1%</sub> (mL/L)	Fe (mg/L)	Fe/Fe <sub>0</sub>	Mn (mg/L)	Veloc. (cm/min)	
0,0	7,3	0,0	0,0	0,30	0,77	0,00	25,0	
				0,35	0,90	0,02	20,0	
				0,35	0,90	0,00	16,0	
				0,31	0,79	0,00	12,0	
				0,28	0,72	0,00	6,0	
30,0	6,7	0,0	0,0	6,93	17,77	0,08	25,0	
				5,96	15,28	0,01	20,0	
				5,68	14,56	0,22	16,0	
				5,45	13,97	0,00	12,0	
				5,13	13,15	0,02	6,0	
	7,0	20,0	0,0	0,0	2,67	6,85	0,00	25,0
					2,20	5,64	0,00	20,0
					1,85	4,74	0,00	16,0
					1,65	4,23	0,03	12,0
					1,54	3,95	0,00	6,0
	7,6	50,0	0,0	0,0	2,09	5,36	0,00	25,0
					1,66	4,26	0,00	20,0
					1,10	2,82	0,07	16,0
					1,02	2,62	0,00	12,0
					0,90	2,31	0,00	6,0
45,0	6,4	0,0	0,0	4,84	12,41	0,00	25,0	
				4,13	10,59	0,00	20,0	
				0,63	1,62	0,00	16,0	
				0,55	1,41	0,00	12,0	
				3,75	9,62	0,00	6,0	
	6,1	0,0	2,8	0,0	8,70	22,31	0,00	25,0
					6,70	17,18	0,00	20,0
					6,14	15,74	0,00	16,0
					5,57	14,28	0,00	12,0
					5,42	13,90	0,00	6,0
	7,1	40,0	0,0	0,0	1,82	4,67	0,00	25,0
					1,21	3,10	0,00	20,0
					1,17	3,00	0,00	16,0
					0,97	2,49	0,00	12,0
					0,90	2,31	0,00	6,0
65,0	6,1	0,0	0,0	5,53	14,18	0,00	25,0	
				3,96	10,15	0,00	20,0	
				2,97	7,62	0,00	16,0	
				2,52	6,46	0,00	12,0	
				2,26	5,79	0,00	6,0	
	5,7	0,0	5,6	0,0	2,90	7,44	0,01	25,0
					2,38	6,10	0,01	20,0
					1,33	3,41	0,01	16,0
					1,05	2,69	0,02	12,0
					0,69	1,77	0,01	6,0
	4,7	0,0	13,9	0,0	1,65	4,23	0,02	25,0
					1,10	2,82	0,02	20,0
					0,79	2,03	0,03	16,0
					0,77	1,97	0,03	12,0
					0,73	1,87	0,02	6,0

FIGURA 57 - Continuação



## **ANEXO 2**

**Dados completos referentes à segunda etapa de ensaios**

## Dosagem de Cloreto Férrico = 30 mg/L

### ① Características do efluente do reator anaeróbio: (Água Tipo A)

- ↘ Temperatura =  $25 \pm 2$  (°C)
- ↘ pH = 6,8
- ↘ Turbidez = 35,0 – 45,0 (uT)
- ↘ Cor Aparente = 205,0 – 210,0 (uPtCo)
- ↘ DQO = 85,0 (mg/L)
- ↘ P total = 12,3 (mg/L)
- ↘ Alcalinidade = 207,9 (mg/L CaCO<sub>3</sub>)

### ② Características do afluente do reator anaeróbio:

- ↘ Temperatura =  $25 \pm 2$  (°C)
- ↘ pH = 6,9
- ↘ Turbidez = 106,0 – 150,0 (uT)
- ↘ Cor Aparente = 1945,0 – 1955,0 (uPtCo)
- ↘ DQO = 575,0 (mg/L)
- ↘ P total = 12,8 (mg/L)
- ↘ Alcalinidade = 148,5 (mg/L CaCO<sub>3</sub>)



D <sub>O</sub> <sub>2</sub> (mg/L)	pH	D <sub>Ca</sub> (mg/L)	D <sub>HCl</sub> 1% (mL)	Alcalin.		R. (%)	Turb. (uT)	T / R.		Cor (uPCO)	C / R.		DQO (mg/L)	DQO / R.		P (mg/L)	P / R.		V (cm <sup>3</sup> /min)
				(mg/LCaCO <sub>3</sub> )	(%)			T <sub>0</sub> (%)	R. (%)		C <sub>0</sub> (%)	R. (%)		DQO <sub>0</sub> (%)	R. (%)		P <sub>0</sub> (%)	R. (%)	
3,0	5,2	0,0	27,8	-	-	6,9	0,20	80,3	126,5	0,62	38,3	42,0	0,49	50,6	8,2	0,67	32,9	25,0	
				-	-	3,0	0,09	91,3	63,3	0,31	69,1	39,1	0,46	54,0	6,0	0,49	50,8	18,5	
				-	-	2,1	0,06	93,9	60,5	0,30	70,5	39,1	0,46	54,0	6,0	0,49	51,3	12,0	
				31,6	84,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,5	0,0	25,0	-	-	23,0	0,66	34,3	85,3	0,42	58,4	44,9	0,53	47,2	7,1	0,58	42,4	25,0	
				-	-	8,5	0,24	75,8	57,8	0,28	71,8	39,1	0,46	54,0	6,2	0,51	49,1	18,5	
				-	-	6,2	0,18	82,2	49,5	0,24	75,9	42,0	0,49	50,6	5,9	0,49	51,5	12,0	
				45,5	78,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,7	0,0	0,0	-	-	9,4	0,27	73,3	101,8	0,50	50,4	53,6	0,63	36,9	7,1	0,58	42,2	25,0	
				-	-	5,8	0,17	83,5	79,8	0,39	61,1	47,8	0,56	43,8	7,0	0,57	43,3	18,5	
				-	-	5,0	0,14	85,6	71,5	0,35	65,1	44,9	0,53	47,2	6,5	0,53	46,7	12,0	
				166,7	19,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7,7	100,0	0,0	-	-	5,8	0,17	83,4	74,3	0,36	63,8	50,7	0,60	40,3	7,4	0,61	39,3	25,0		
			-	-	3,6	0,10	89,7	66,0	0,32	67,8	39,1	0,46	54,0	6,8	0,55	44,5	18,5		
			-	-	3,0	0,08	91,5	63,3	0,31	69,1	39,1	0,46	54,0	6,9	0,56	43,8	12,0		
			189,6	8,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,0
6,0	5,1	0,0	28,9	-	-	3,6	0,10	89,7	44,0	0,21	78,5	50,7	0,60	40,3	6,4	0,53	47,5	25,0	
				-	-	2,4	0,07	93,0	38,5	0,19	81,2	36,2	0,43	57,5	6,3	0,51	48,6	18,5	
				-	-	1,3	0,04	96,2	30,3	0,15	85,2	42,0	0,49	50,6	6,0	0,49	50,8	12,0	
				29,7	85,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,4	0,0	25,0	-	-	4,1	0,12	88,2	55,0	0,27	73,2	39,1	0,46	54,0	7,1	0,58	42,4	25,0	
				-	-	2,1	0,06	94,1	44,0	0,21	78,5	36,2	0,43	57,5	5,5	0,45	55,1	18,5	
				-	-	1,8	0,05	94,8	38,5	0,19	81,2	47,8	0,56	43,8	6,0	0,49	50,8	12,0	
				44,6	78,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,7	0,0	0,0	-	-	4,3	0,12	87,6	66,0	0,32	67,8	47,8	0,56	43,8	7,3	0,60	40,3	25,0	
				-	-	3,0	0,08	91,5	63,3	0,31	69,1	42,0	0,49	50,6	7,4	0,61	39,3	18,5	
				-	-	2,8	0,08	91,9	55,0	0,27	73,2	50,7	0,60	40,3	7,1	0,58	41,7	12,0	
				148,5	28,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7,7	90,0	0,0	-	-	3,5	0,10	90,1	60,5	0,30	70,5	53,6	0,63	36,9	7,1	0,58	42,3	25,0		
			-	-	2,4	0,07	93,1	52,3	0,25	74,5	44,9	0,53	47,2	7,5	0,61	39,1	18,5		
			-	-	2,0	0,06	94,3	49,5	0,24	75,9	33,2	0,39	60,9	7,7	0,63	36,9	12,0		
			178,2	14,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,0
9,0	5,1	0,0	29,4	-	-	3,1	0,09	91,0	44,0	0,21	78,5	36,2	0,43	57,5	6,9	0,56	43,9	25,0	
				-	-	1,8	0,05	94,8	35,8	0,17	82,6	62,4	0,73	26,6	5,9	0,48	51,7	18,5	
				-	-	1,0	0,03	97,0	30,3	0,15	85,2	33,2	0,39	60,9	5,9	0,48	51,9	12,0	
				29,7	85,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,5	0,0	25,0	-	-	4,9	0,14	86,0	55,0	0,27	73,2	44,9	0,53	47,2	6,9	0,56	44,1	25,0	
				-	-	2,8	0,08	91,9	49,5	0,24	75,9	71,1	0,84	16,3	6,8	0,56	44,3	18,5	
				-	-	1,7	0,05	95,0	44,0	0,21	78,5	50,7	0,60	40,3	6,7	0,54	45,6	12,0	
				44,6	78,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,7	0,0	0,0	-	-	4,2	0,12	87,9	82,5	0,40	59,8	47,8	0,56	43,8	7,1	0,58	41,7	25,0	
				-	-	3,0	0,09	91,4	60,5	0,30	70,5	53,6	0,63	36,9	6,8	0,56	44,4	18,5	
				-	-	2,3	0,07	93,3	55,0	0,27	73,2	47,8	0,56	43,8	7,3	0,60	40,3	12,0	
				163,4	21,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7,5	50,0	0,0	-	-	4,1	0,12	88,4	55,0	0,27	73,2	44,9	0,53	47,2	7,2	0,59	41,5	25,0		
			-	-	2,7	0,08	92,2	52,3	0,25	74,5	53,6	0,63	36,9	7,7	0,63	36,9	18,5		
			-	-	2,0	0,06	94,4	49,5	0,24	75,9	50,7	0,60	40,3	7,1	0,58	42,2	12,0		
			178,2	14,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,0

FIGURA 58 - Dosagem de cloreto férrico = 30 mg/L (Água Tipo A)

## Dosagem de Cloreto Férrico = 45 mg/L

### ① Características do efluente do reator anaeróbio: (Água Tipo B)

- ↘ Temperatura =  $25 \pm 2$  (°C)
- ↘ pH = 6,7
- ↘ Turbidez = 105,0 – 110,0 (uT)
- ↘ Cor Aparente = 360,0 – 370,0 (uPtCo)
- ↘ DQO = 128,0 (mg/L)
- ↘ P total = 9,8 (mg/L)
- ↘ Alcalinidade = 178,2 (mg/L CaCO<sub>3</sub>)

### ② Características do afluente do reator anaeróbio:

- ↘ Temperatura =  $25 \pm 2$  (°C)
- ↘ pH = 6,8
- ↘ Turbidez = 250,0 – 255,0 (uT)
- ↘ Cor Aparente = 1530,0 – 1535,0 (uPtCo)
- ↘ DQO = 630,0 (mg/L)
- ↘ P total = 10,2 (mg/L)
- ↘ Alcalinidade = 207,9 (mg/L CaCO<sub>3</sub>)



D <sub>O3</sub> (mg/L)	pH	D <sub>CaI</sub> (mg/L)	D <sub>HCl1%</sub> (m/L)	Alcalin. (mg/LCaCO <sub>3</sub> )	R. (%)	Turb. (uT)	T /	R.	Cor (uPtCO)	C /	R.	DQO (mg/L)	DQO /	R.	P (mg/L)	P /	R.	V (cm/min)
							T <sub>0</sub>	(%)		C <sub>0</sub>	(%)		DQO <sub>0</sub>	(%)		P <sub>0</sub>	(%)	
3,0	5,1	0,0	22,2	-	-	11,1	0,11	89,4	86,9	0,24	75,9	68,4	0,53	46,6	8,6	0,88	12,3	25,0
				-	-	7,5	0,07	92,9	58,3	0,16	83,8	42,1	0,33	67,1	3,0	0,31	68,9	18,5
				-	-	2,4	0,02	97,7	49,5	0,14	86,3	36,3	0,28	71,6	1,3	0,13	87,1	12,0
				15,2	91,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,4	0,0	19,4	-	-	41,8	0,40	60,2	157,3	0,44	56,3	59,6	0,47	53,4	4,8	0,50	50,3	25,0
				-	-	9,6	0,09	90,9	77,0	0,21	78,6	45,1	0,35	64,8	3,2	0,32	67,6	18,5
				-	-	3,8	0,04	96,4	60,5	0,17	83,2	50,9	0,40	60,3	2,0	0,21	79,2	12,0
				30,3	83,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,6	0,0	0,0	-	-	56,5	0,54	46,2	255,2	0,71	29,1	85,8	0,67	32,9	6,7	0,68	31,8	25,0
				-	-	41,1	0,39	60,8	174,9	0,49	51,4	68,4	0,53	46,6	4,6	0,47	52,7	18,5
				-	-	37,8	0,36	64,0	163,9	0,46	54,5	80,0	0,63	37,5	4,2	0,43	56,6	12,0
				123,8	30,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7,7	95,0	0,0	-	-	25,2	0,24	76,0	154,0	0,43	57,2	74,2	0,58	42,0	4,7	0,48	51,7	25,0
				-	-	18,8	0,18	82,1	124,3	0,35	65,5	62,5	0,49	51,1	4,6	0,47	53,0	18,5
				-	-	16,8	0,16	84,0	123,2	0,34	65,8	80,0	0,63	37,5	4,3	0,44	56,0	12,0
				148,5	16,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6,0	4,8	0,0	23,3	-	-	7,0	0,07	93,3	49,5	0,14	86,3	48,0	0,37	62,5	2,0	0,21	79,2	25,0
				-	-	5,7	0,05	94,5	48,4	0,13	86,6	48,0	0,37	62,5	1,5	0,15	85,1	18,5
				-	-	1,7	0,02	98,4	26,4	0,07	92,7	48,0	0,37	62,5	0,7	0,08	92,4	12,0
				9,9	94,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,4	0,0	19,4	-	-	16,5	0,16	84,3	51,7	0,14	85,6	68,4	0,53	46,6	2,3	0,23	76,9	25,0
				-	-	9,7	0,09	90,8	51,7	0,14	85,6	65,4	0,51	48,9	2,6	0,27	73,1	18,5
				-	-	3,3	0,03	96,9	33,0	0,09	90,8	65,4	0,51	48,9	1,8	0,18	82,0	12,0
				24,8	86,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,7	0,0	0,0	-	-	35,6	0,34	66,1	119,9	0,33	66,7	77,1	0,60	39,8	4,4	0,45	54,6	25,0
				-	-	31,9	0,30	69,6	138,6	0,39	61,5	74,2	0,58	42,0	4,5	0,46	53,7	18,5
				-	-	27,1	0,26	74,2	128,7	0,36	64,3	74,2	0,58	42,0	4,1	0,42	58,3	12,0
				104,0	41,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7,5	75,0	0,0	-	-	18,4	0,17	82,5	83,6	0,23	76,8	65,4	0,51	48,9	4,1	0,42	58,3	25,0
				-	-	15,7	0,15	85,0	80,3	0,22	77,7	62,5	0,49	51,1	4,2	0,43	57,0	18,5
				-	-	14,6	0,14	86,1	78,1	0,22	78,3	71,3	0,56	44,3	3,8	0,39	60,9	12,0
				133,7	25,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9,0	4,9	0,0	22,2	-	-	7,0	0,07	93,3	38,5	0,11	89,3	56,7	0,44	55,7	2,0	0,21	79,1	25,0
				-	-	5,3	0,05	95,0	34,1	0,09	90,5	94,6	0,74	26,1	1,7	0,18	82,4	18,5
				-	-	2,2	0,02	97,9	26,4	0,07	92,7	53,8	0,42	58,0	1,2	0,13	87,4	12,0
				14,9	91,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,4	0,0	19,4	-	-	6,5	0,06	93,8	42,9	0,12	88,1	68,4	0,53	46,6	2,8	0,29	71,4	25,0
				-	-	4,7	0,04	95,5	39,6	0,11	89,0	65,4	0,51	48,9	2,4	0,25	75,4	18,5
				-	-	1,6	0,02	98,5	29,7	0,08	91,8	59,6	0,47	53,4	2,5	0,26	73,9	12,0
				37,1	79,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,7	0,0	0,0	-	-	29,5	0,28	71,9	108,9	0,30	69,8	85,8	0,67	32,9	4,4	0,45	55,3	25,0
				-	-	26,8	0,26	74,4	105,6	0,29	70,7	74,2	0,58	42,0	4,0	0,41	59,5	18,5
				-	-	25,0	0,24	76,2	94,6	0,26	73,7	74,2	0,58	42,0	4,0	0,41	59,4	12,0
				126,2	29,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7,4	56,0	0,0	-	-	21,6	0,21	79,5	89,1	0,25	75,3	82,9	0,65	35,2	4,6	0,47	52,7	25,0
				-	-	18,8	0,18	82,1	77,0	0,21	78,6	91,7	0,72	28,4	4,2	0,43	57,0	18,5
				-	-	18,8	0,18	82,1	78,1	0,22	78,3	71,3	0,56	44,3	4,0	0,41	59,1	12,0
				163,4	8,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

FIGURA 59 - Dosagem de cloreto férrico = 45 mg/L (Água Tipo B)

## Dosagem de Cloreto Férrico = 65 mg/L

### ① Características do efluente do reator anaeróbio: (Água Tipo C)

- ↘ Temperatura =  $25 \pm 2$  (°C)
- ↘ pH = 6,7
- ↘ Turbidez = 35,5 – 40,0 (uT)
- ↘ Cor Aparente = 390,0 – 398,0 (uPtCo)
- ↘ DQO = 188,0 (mg/L)
- ↘ P total = 10,5 (mg/L)
- ↘ Alcalinidade = 222,8 (mg/L CaCO<sub>3</sub>)

### ② Características do afluente do reator anaeróbio:

- ↘ Temperatura =  $25 \pm 2$  (°C)
- ↘ pH = 6,9
- ↘ Turbidez = 205,0 – 210,0 (uT)
- ↘ Cor Aparente = 1600,0 – 1605,0 (uPtCo)
- ↘ DQO = 623,0 (mg/L)
- ↘ P total = 12,5 (mg/L)
- ↘ Alcalinidade = 193,1 (mg/L CaCO<sub>3</sub>)



D <sub>O3</sub> (mg/L)	pH	D <sub>Ca</sub> (mg/L)	D <sub>HCl1%</sub> (ml/L)	Alcalin. (mg/LCaCO <sub>3</sub> )	R. (%)	Turb. (UT)	T / T <sub>0</sub>	R. (%)	Cor (uPtCO)	C / C <sub>0</sub>	R. (%)	DQO (mg/L)	DQO / DQO <sub>0</sub>	R. (%)	P (mg/L)	P / P <sub>0</sub>	R. (%)	V (cm/min)
3,0	5,2	0,0	23,3	-	-	6,2	0,17	82,3	112,2	0,29	71,2	45,1	0,24	76,0	2,9	0,28	72,3	25,0
				-	-	3,7	0,10	89,4	75,9	0,19	80,5	39,2	0,21	79,1	2,4	0,23	77,5	18,5
				-	-	2,4	0,07	93,1	66,0	0,17	83,1	45,1	0,24	76,0	2,2	0,22	78,5	12,0
				45,5	79,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,6	0,0	19,4	-	-	27,9	0,79	20,2	315,7	0,81	19,1	80,0	0,43	57,4	5,5	0,53	47,0	25,0
				-	-	7,3	0,21	79,2	141,9	0,36	63,6	50,9	0,27	72,9	3,3	0,31	68,6	18,5
				-	-	3,9	0,11	88,7	78,1	0,20	80,0	45,1	0,24	76,0	2,4	0,23	76,8	12,0
				44,6	80,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,6	0,0	0,0	-	-	51,0	1,44	45,8	481,8	1,24	23,5	88,7	0,47	52,8	7,3	0,70	30,2	25,0
				-	-	23,3	0,66	33,4	260,7	0,67	33,2	68,4	0,36	63,6	4,4	0,42	58,2	18,5
				-	-	14,9	0,42	57,6	150,7	0,39	61,4	50,9	0,27	72,9	2,7	0,26	74,1	12,0
				163,4	26,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7,4	95,0	0,0	-	-	17,7	0,50	49,4	294,8	0,76	24,4	62,5	0,33	66,7	4,5	0,43	56,7	25,0	
			-	-	6,3	0,18	82,1	162,8	0,42	58,3	50,9	0,27	72,9	3,0	0,29	71,0	18,5	
			-	-	5,7	0,16	83,6	148,5	0,38	61,9	48,0	0,26	74,5	3,1	0,29	70,6	12,0	
			193,1	13,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6,0	4,9	0,0	27,8	-	-	3,6	0,10	89,8	46,2	0,12	88,2	18,8	0,10	90,0	1,8	0,17	83,1	25,0
				-	-	2,4	0,07	93,2	39,6	0,10	89,8	15,9	0,08	91,5	1,5	0,15	85,4	18,5
				-	-	2,1	0,06	94,1	38,5	0,10	90,1	21,7	0,12	88,4	1,4	0,13	86,6	12,0
				23,8	89,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,4	0,0	25,0	-	-	6,3	0,18	81,9	74,8	0,19	80,8	36,3	0,19	80,7	2,3	0,22	77,9	25,0
				-	-	3,4	0,10	90,2	53,9	0,14	86,2	30,5	0,16	83,8	2,1	0,20	80,3	18,5
				-	-	1,3	0,04	96,3	34,1	0,09	91,3	33,4	0,18	82,2	1,4	0,13	86,8	12,0
				39,6	82,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,5	0,0	0,0	-	-	46,1	1,30	31,7	408,1	1,05	4,6	106,2	0,57	43,5	7,9	0,75	24,6	25,0
				-	-	21,9	0,62	37,5	177,1	0,45	54,6	56,7	0,30	69,8	3,3	0,31	68,7	18,5
				-	-	18,3	0,51	47,8	146,3	0,38	62,5	56,7	0,30	69,8	2,8	0,27	73,0	12,0
				155,9	30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7,4	80,0	0,0	-	-	10,0	0,28	71,3	179,3	0,46	54,0	65,4	0,35	65,2	3,7	0,35	64,9	25,0	
			-	-	5,7	0,16	83,7	130,9	0,34	66,4	48,0	0,26	74,5	3,1	0,29	70,7	18,5	
			-	-	5,1	0,14	85,4	122,1	0,31	68,7	48,0	0,26	74,5	2,8	0,26	73,5	12,0	
			178,2	20,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9,0	4,9	0,0	27,8	-	-	7,2	0,20	79,5	55,0	0,14	85,9	39,2	0,21	79,1	2,6	0,24	75,5	25,0
				-	-	1,7	0,05	95,3	31,9	0,08	91,8	36,3	0,19	80,7	1,7	0,16	84,2	18,5
				-	-	0,9	0,02	97,5	24,2	0,06	93,8	30,5	0,16	83,8	1,2	0,11	88,6	12,0
				7,4	96,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,4	0,0	25,6	-	-	3,7	0,10	89,6	53,9	0,14	86,2	56,7	0,30	69,8	2,4	0,23	77,3	25,0
				-	-	1,9	0,05	94,5	35,2	0,09	91,0	33,4	0,18	82,2	1,9	0,18	81,7	18,5
				-	-	1,0	0,03	97,0	26,4	0,07	93,2	39,2	0,21	79,1	1,6	0,15	85,0	12,0
				33,4	85,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,5	0,0	0,0	-	-	24,0	0,68	31,5	144,1	0,37	63,1	62,5	0,33	66,7	3,2	0,31	69,1	25,0
				-	-	22,8	0,64	34,9	135,3	0,35	65,3	68,4	0,36	63,6	3,3	0,31	68,8	18,5
				-	-	20,2	0,57	42,2	116,6	0,30	70,1	53,8	0,29	71,4	2,8	0,27	73,1	12,0
				155,9	30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7,5	82,0	0,0	-	-	17,2	0,48	51,0	119,9	0,31	69,3	48,0	0,26	74,5	3,1	0,30	70,4	25,0	
			-	-	13,1	0,37	62,6	102,3	0,26	73,8	39,2	0,21	79,1	2,8	0,27	73,0	18,5	
			-	-	12,2	0,34	65,1	96,8	0,25	75,2	36,3	0,19	80,7	2,9	0,28	72,0	12,0	
			183,2	17,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

FIGURA 60 - Dosagem de cloreto férrico = 65 mg/L (Água Tipo C)

## Dosagem de Ozônio Aplicada = 0 mg/L

### ① Características do efluente do reator anaeróbio: (Água Tipo D)

- ↘ Temperatura =  $25 \pm 2$  (°C)
- ↘ pH = 6,7
- ↘ Turbidez = 55,0 – 70,0 (uT)
- ↘ Cor Aparente = 460,0 – 480,0 (uPtCo)
- ↘ DQO = 182,0 (mg/L)
- ↘ P total = 10,5 (mg/L)
- ↘ Alcalinidade = 185,6 (mg/L CaCO<sub>3</sub>)

### ② Características do afluente do reator anaeróbio:

- ↘ Temperatura =  $25 \pm 2$  (°C)
- ↘ pH = 6,9
- ↘ Turbidez = 230,0 – 240,0 (uT)
- ↘ Cor Aparente = 1850,0 – 1865,0 (uPtCo)
- ↘ DQO = 732,0 (mg/L)
- ↘ P total = 13,4 (mg/L)
- ↘ Alcalinidade = 185,6 (mg/L CaCO<sub>3</sub>)



D <sub>FeCl3</sub>	pH	D <sub>Cal</sub>	D <sub>HCl1%</sub>	Alcalin.		Turb.	T / R.		Cor	C / R.		DQO	DQO / R.		P	P / R.		V
				(mg/LCaCO <sub>3</sub> )	(%)		T <sub>0</sub>	(%)		C <sub>0</sub>	(%)		DQO <sub>0</sub>	(%)		P <sub>0</sub>	(%)	
30,0	5,1	0,0	47,0	-	-	47,2	0,86	21,4	294,8	0,64	35,9	85,8	0,47	52,8	-	-	-	25,0
				-	-	27,3	0,50	54,5	244,2	0,53	46,9	74,2	0,41	59,2	5,9	0,56	43,9	18,5
				-	-	22,7	0,41	62,2	179,3	0,39	61,0	74,2	0,41	59,2	5,8	0,56	44,5	12,0
				34,7	81,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,5	0,0	40,0	-	-	48,5	0,88	19,2	333,3	0,72	27,5	115,0	0,63	36,8	7,8	0,74	26,0	25,0
				-	-	37,2	0,68	38,0	249,7	0,54	45,7	71,3	0,39	60,8	6,6	0,63	37,1	18,5
				-	-	32,5	0,59	45,9	211,2	0,46	54,1	65,4	0,36	64,0	6,3	0,60	40,1	12,0
				58,8	68,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,5	0,0	0,0	-	-	46,2	0,84	23,0	432,3	0,94	6,0	109,1	0,60	40,0	7,7	0,73	27,1	25,0
				-	-	38,1	0,69	36,6	344,3	0,75	25,2	132,4	0,73	27,2	6,9	0,65	34,7	18,5
				-	-	27,0	0,49	55,1	293,7	0,64	36,2	82,9	0,46	54,4	5,9	0,56	43,8	12,0
				155,9	16,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7,4	100,0	0,0	-	-	39,9	0,73	33,5	396,0	0,86	13,9	85,8	0,47	52,8	7,2	0,69	31,3	25,0	
			-	-	21,2	0,39	64,6	260,7	0,57	43,3	65,4	0,36	64,0	5,8	0,56	44,5	18,5	
			-	-	15,2	0,28	74,7	237,6	0,52	48,3	65,4	0,36	64,0	6,0	0,57	43,2	12,0	
			200,5	(6,0)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45,0	4,9	0,0	50,0	-	-	45,3	0,82	24,5	294,8	0,64	35,9	109,1	0,60	40,0	5,4	0,51	48,7	25,0
				-	-	9,1	0,17	84,8	81,4	0,18	82,3	50,9	0,28	72,0	3,8	0,36	64,3	18,5
				-	-	1,6	0,03	97,3	37,4	0,08	91,9	50,9	0,28	72,0	3,3	0,31	68,8	12,0
				26,7	85,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,4	0,0	45,0	-	-	34,1	0,62	43,2	267,3	0,58	41,9	91,7	0,50	49,6	6,5	0,62	38,4	25,0
				-	-	13,4	0,24	77,6	198,0	0,43	57,0	65,4	0,36	64,0	4,9	0,47	52,9	18,5
				-	-	7,6	0,14	87,4	163,9	0,36	64,4	53,8	0,30	70,4	4,2	0,40	59,9	12,0
				33,4	82,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,4	0,0	0,0	-	-	76,3	1,39	27,2	616,0	1,34	33,9	132,4	0,73	27,2	12,1	1,15	15,2	25,0
				-	-	63,3	1,15	5,4	533,5	1,16	16,0	123,7	0,68	32,0	11,2	1,06	6,3	18,5
				-	-	24,4	0,44	59,3	262,9	0,57	42,8	82,9	0,46	54,4	5,4	0,52	48,2	12,0
				142,6	23,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7,3	105,0	0,0	-	-	39,6	0,72	34,0	371,8	0,81	19,2	94,6	0,52	48,0	5,8	0,56	44,4	25,0	
			-	-	23,8	0,43	60,4	244,2	0,53	46,9	68,4	0,38	62,4	4,4	0,42	58,5	18,5	
			-	-	21,6	0,39	64,1	233,2	0,51	49,3	77,1	0,42	57,6	4,2	0,40	59,7	12,0	
			193,1	4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65,0	5,0	0,0	45,0	-	-	52,0	0,95	13,3	468,6	1,02	1,9	176,1	0,97	3,2	6,4	0,61	38,7	25,0
				-	-	7,7	0,14	87,2	99,0	0,22	78,5	56,7	0,31	68,8	2,6	0,24	75,7	18,5
				-	-	2,9	0,05	95,2	64,9	0,14	85,9	50,9	0,28	72,0	2,1	0,20	80,0	12,0
				22,3	88,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,4	0,0	37,0	-	-	47,1	0,86	21,5	338,8	0,74	26,3	120,8	0,66	33,6	5,4	0,52	48,2	25,0
				-	-	33,7	0,61	43,9	169,4	0,37	63,2	65,4	0,36	64,0	3,2	0,30	69,6	18,5
				-	-	4,4	0,08	92,7	81,4	0,18	82,3	59,6	0,33	67,2	2,2	0,21	78,7	12,0
				37,1	80,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,4	0,0	0,0	-	-	60,2	1,09	0,3	764,5	1,66	66,2	164,5	0,90	9,6	10,9	1,04	4,0	25,0
				-	-	55,1	1,00	8,2	391,6	0,85	14,9	106,2	0,58	41,6	5,9	0,56	44,2	18,5
				-	-	27,3	0,50	54,5	222,2	0,48	51,7	68,4	0,38	62,4	3,2	0,31	69,1	12,0
				133,7	28,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7,4	121,0	0,0	-	-	62,0	1,13	3,4	437,8	0,95	4,8	106,2	0,58	41,6	5,4	0,52	48,2	25,0	
			-	-	49,7	0,90	17,1	299,2	0,65	35,0	88,7	0,49	51,2	3,8	0,36	63,7	18,5	
			-	-	23,1	0,42	61,5	217,8	0,47	52,7	71,3	0,39	60,8	3,0	0,28	71,5	12,0	
			181,9	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

FIGURA 61 - Dosagem de ozônio = 0 mg/L (Água Tipo D)



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA. (1991). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19 th. ed. American Public Health Association, Washington, D.C.
- CAMPOS, J. R.; REALI, M. A. P.; DOMBROSKI, S. A. G.; MARCHETTO, M. & LIMA, M. R. A. (1996). Tratamento físico-químico por flotação de efluentes de reatores anaeróbios. In: XXV CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, México, 1996.
- COLLINS, A. G.; GRASSO, D.; FARVARDIN, M. R. (1989). Evaluating preozonation as an aid to coagulation – flocculation processes. In: THE NINTH OZONE WORLD CONGRESS. New York, 1989. *Proceedings*. USA.
- DI MATTEO, M. L. (1992). *Influência da pré-ozonização na coagulação - flocculação utilizando o cloreto férrico como coagulante*. Campinas. 249p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP.
- DOWBIGGIN, W. B. & SINGER, P. C. (1989). Effects of natural organic matter and calcium on ozone-induced particle destabilization. *Journal of The American Water Works Association*, v. 81 (8), p.77-84, Aug.
- FARVARDIN, M. R. & COLLINS, A. G. (1989). Preozonation as an aid in the coagulation of humic substances-optimum preozonation dose. *Water Research*, v. 23 (3), p.307-316, Sep.
- GILLI, G.; SCURSATONI, L.; PALIN, L.; BONO, R.; CARRARO, E.; MEUCCI, L. (1989). Water disinfection: a relationship between ozone and aldehydes production. In: THE NINTH OZONE WORLD CONGRESS. New York, 1989. *Proceedings*. USA.
- GLAZE, W. H. (1987). Drinking-water treatment with ozone. *Environmental Science Technology*, v. 21 (3), p.224-230, Mar.
- GLAZE, W. H. (1989). Evaluation of ozonation by-products from two california surface water. *Journal of The American Water Works Association*, v. 81 (8), p.66-73, Aug.
- HOIGNÉ, J. & BADER, H. (1983). Rate constants of reaction of ozone with organic and inorganic compounds in water. *Water Research*, v. 17 (9), p.173-183, Sep.



- LANGLAIS, B.; RECKHOW, D. A.; BRINK, D. R. (1991). *Ozone in water treatment - application and engineering*. AWWA Research Foundation. Compagnie Générale des Eux. Lewis Publishers, Inc. 551p.
- LAPLANCHE, A.; SAUZE, N. L.; LANGLAIS, B. (1989). Simulation of ozone transfer in water comparison with a pilot unit. In: THE NINTH OZONE WORLD CONGRESS. New York, 1989. *Proceedings*. USA.
- LIANG, S.; STOLARIK, G. F.; TATE, C. H.; GLAZE, W. H. (1989). The "big switch": los angeles aqueduct filtration plant treatment of california state project water. In: THE NINTH OZONE WORLD CONGRESS. New York, 1989. *Proceedings*. USA.
- LIU, S. H. & LIN, C. M. (1993). Treatment of textile waste effluents by ozonation and chemical coagulation. *Water Research*, v. 27 (12), p.1743-1748, Dec.
- MASSCHELEIN, W. J. (1989). Present state of standardization of ozone measurements in europe. In: THE NINTH OZONE WORLD CONGRESS. New York, 1989. *Proceedings*. USA.
- NEBEL, C. (1981). Ozone. In: KIRK, R. E. & OTHMER, D. F. ed. *Encyclopedia of chemical technology*. 3<sup>rd</sup> edition. Wiley, New York. p.683-713.
- PENETRA, R. G (1998). *Pós-tratamento físico-químico por flotação de efluentes de reatores anaeróbios de manta de lodo*. São Carlos. 140p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- POVINELLI, S. C. S. (1994). *Estudo da hidrodinâmica e partida de reator anaeróbio com chicanas tratando esgoto sanitário*. São Carlos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- REALI, M. A. P. (1984). *Aplicação da flotação por ar dissolvido ao tratamento de águas de abastecimento*. São Carlos. 186p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- REALI, M. A. P. (1991). *Concepção e avaliação de um sistema compacto para tratamento de águas de abastecimento utilizando o processo de flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante*. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- RICE, R. G. & NETZER, A. (1982). *Handbook of ozone technology and applications*. Boston, Butterworth Publishers. p. 134-213.
- SCHULHOF, P. & SMITH, P. D. (1989). Generation of ozone. In: INTERNATIONAL OZONE SYMPOSIUM. Rio de Janeiro, 1988. *Proceedings*. Brazil.
- SENS, M. L.; MELO FILHO, L. C.; LAPLANCHE, A. (1988). Efeito da pré-ozonização sobre a geração de lodo em processos físico-químicos de estações de tratamento de efluentes têxteis. *Revista da ABES*.

- SIERKA, R. A.; AMY, G. L.; RENA, J. (1989). Molecular weight characterization of color constituents and subsequent removal by ozone and activated carbon adsorption. In: THE NINTH OZONE WORLD CONGRESS. New York, 1989. *Proceedings*. USA.
- SOTELO, J. L.; BELTRÁN, F. J.; BENITEZ, F. J.; BELTRÁN-HEREDIA, J. (1989). Henry's law constant for the ozone-water system. *Water Research*, v. 23 (10), p.1239-1989, Oct.
- STAEHELIN, J. & HOIGNÉ, J. (1982). Decomposition of ozone in water: rate of initiation by hidroxide ions and hydrogen peroxide. *Science Technology*, v. 16 (10), p.676-681, Oct.
- STANLEY, J. & JOHNSON, D. (1981). Analysis of ozone in aqueous solution. In: In: RICE, R. G. & NETZER, A. ed. *Handbook of ozone technology and applications*. Ann Arbor, Michigan. Ann Arbor Science Publications. v.1.