

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental**  
**Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental**

**MARIA ELIZA NAGEL HASSEMER**

**TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL -  
PROCESSO FÍSICO-QUÍMICO COM OZÔNIO E  
FLOCULAÇÃO EM MEIO GRANULAR**

Dissertação apresentada à Universidade  
Federal de Santa Catarina, para  
Obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Maurício Luiz Sens, Dr.

Florianópolis, março 2000

# TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL – PROCESSO FÍSICO-QUÍMICO COM OZÔNIO E FLOCULAÇÃO EM MEIO GRANULAR

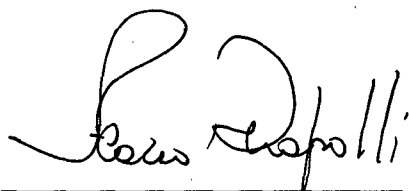
MARIA ELIZA NAGEL HASSEMER

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

na Área de Tecnologias de Saneamento Ambiental

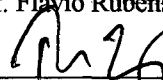
Aprovado por:



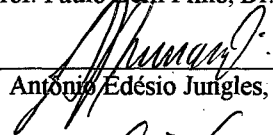
Prof. Flávio Rubens Lapolli, Dr.  
(Coordenador)




Prof. Flávio Rubens Lapolli, Dr.



Prof. Paulo Bell Filho, Dr.



Prof. Antônio Edésio Jungles, Dr.



Prof. Maurício Luiz Sens, Dr.  
(Orientador)

FLORIANÓPOLIS, SC – BRASIL  
MARÇO/2000

Dedico esta dissertação aos meus pais,  
Erica (in memoriam) e Luiz Helmuth,  
que me deram a vida.

*“Que nossos esforços desafiem as impossibilidades.*

*Lembraí-vos que as grandes proezas da história foram conquistadas do que parecia impossível.”*

*(Charles Chaplin)*

Ao meu marido Wilson,  
e aos meus filhos Gustavo e Leonardo,  
a certeza de que o melhor e maior tesouro  
que se pode acumular na Terra é o saber.



## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Maurício Luiz Sens, orientador e amigo, pelo incentivo e apoio durante todo o período deste trabalho.

Ao colega e amigo Ramon Lucas Dalsasso pelo auxílio e montagem dos equipamentos de ozonização e melhorias no piloto de floculação, como também pelas inúmeras sugestões e colaborações durante todo o período de trabalho.

Ao colega Leandro Bassani pelo auxílio nos ensaios de coagulação-floculação.

Ao bolsista Deverson pelo apoio e compreensão durante a realização da pesquisa.

À amiga e colega de mestrado Kelli, pelo companheirismo em todos os momentos da pesquisa; e à todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

À Indústria Têxtil Damyller por gentilmente ceder o efluente que serviu de estudo para este trabalho. Ao químico Pedro Eduardo, pela sua atenção e esforço para nos enviar o efluente.

Ao LIMA (Laboratório Integrado do Meio Ambiente), pelos equipamentos e apoio nas análises realizadas, e pelo grande auxílio dos funcionários Nico e Américo.

À Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação e aos professores, pela contribuição e enriquecimento dos meus conhecimentos, como também ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental pelo apoio.

# SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>XII</b>
<b>RESUMO</b>	<b>XIV</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>XV</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	<b>1</b>
1. INTRODUÇÃO	1
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>3</b>
2. OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVO PRINCIPAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>4</b>
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 A INDÚSTRIA TÊXTIL	4
3.1.1 Processamento Têxtil	4
3.1.2 Natureza do Efluente Têxtil	6
3.1.3 A Cor nos Efluentes Têxteis	6
3.1.4 Tratamento dos Efluentes Têxteis	8
3.1.4.1 Processo de Tratamento	8
3.1.4.2.1 Remoção da Cor por Adsorção	10
3.1.4.2.2 Remoção da Cor por Coagulação-Floculação	11
3.1.4.2.3 Remoção da Cor por Membranas	12
3.1.4.2.4 Remoção da Cor por Ozonização	13
3.2 COAGULAÇÃO - FLOCULAÇÃO	14
3.2.1 Coagulação	14
3.2.1.1 Sistema Coloidal	15
3.2.1.1.1 Partículas Coloidais	16
3.2.1.1.2 Estabilidade dos Colóides	16
3.2.1.2 Mistura Rápida	17
3.2.1.3 Coagulantes	18

3.2.1.3.1	Comportamento Químico do Alumínio e do Ferro	18
3.2.1.3.2	Uso de Polímero como Auxiliar de Coagulação	20
3.2.2	Floculação	21
3.2.2.1	Gradiente de Velocidade	23
3.2.2.2	Floculação em Meio Granular	25
3.2.2.3	Floculação em Meio Granular Expandido	27
3.2.2.3.1	Fenômeno da Fluidização ou Expansão	28
3.2.2.3.2	Perda de Carga	28
3.2.2.3.3	Velocidade Mínima de Fluidização	29
3.2.2.3.4	Velocidade Máxima de Fluidização	30
3.2.2.3.5	Gradiente de Velocidade no Leito Expandido	31
3.2.2.3.6	Número de Camp	31
3.2.2.3.7	Porosidade e Altura do Leito	32
<b>3.3</b>	<b>OZÔNIO</b>	<b>32</b>
3.3.1	Considerações Gerais	32
3.3.2	Propriedades Químicas	33
3.3.3	Produção de Ozônio	35
3.3.4	Transferência de Ozônio	36
3.3.4.1	Câmara de Contato	36
3.3.4.2	Misturador Estático	37
3.3.5	Pré-Ozonização	38
3.3.5.1	Efeitos sobre a Coagulação-Floculação	40
3.3.5.2	Remoção da Cor	40
3.3.6	Pós-Ozonização	41
3.3.7	Subprodutos da Ozonização	41
3.3.8	Toxicidade do Ozônio e dos Efluentes	42

## **CAPÍTULO IV** **44**

<b>4.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>44</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	44
4.2	PROPOSTA DE TRATAMENTO	44
4.3	O EFLUENTE TÊXTIL	47
4.4.1	Ensaio de Coagulação-Floculação	48
4.4.2	Protocolo do Ensaio de Coagulação-Floculação	49
4.4.3	Ensaio de Ozonização	52
4.4.3.1	Unidade de Geração de Ozônio	52
4.4.3.2	Conjunto Piloto de Ozonização	52
4.4.3.3	Condições Experimentais e Transferência de Ozônio	53
4.5	ETAPA 2: OZONIZAÇÃO EM CONTÍNUO / PILOTO DE FLOCULAÇÃO	55
4.5.1	Ozonização com Misturador Estático	55
4.5.1.1	Conjunto Piloto de Ozonização	55
4.5.1.2	Condições Experimentais e Transferência de Ozônio	56
4.5.2	Ozonização com Coluna de Contato	58
4.5.2.1	Conjunto Piloto de Ozonização	58
4.5.2.2	Condições Experimentais e Transferência de Ozônio	59
4.6	ETAPA 3: OZONIZAÇÃO DO EFLUENTE DECANTADO (DESCONTÍNUO)	61
4.6.1	Conjunto Piloto de Ozonização	62
4.6.2	Condições Experimentais e Transferência de Ozônio	62
4.7	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	62
4.7.1	pH e Temperatura	62
4.7.2	Turbidez	62

4.7.3 Cor	63
4.7.4 Demanda Química de Oxigênio (DQO)	63
4.7.5 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	63
4.7.6 Sólidos (Totais, Suspensos, Sedimentáveis)	63
4.7.7 Carbono Orgânico Dissolvido (COD)	64
4.7.8 Alcalinidade	64
4.7.9 Condutividade	64

## **CAPÍTULO V** **65**

<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>65</b>
5.1 CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE TÊXTIL	65
5.2 ESTUDO EM DESCONTÍNUO (ETAPA 1)	66
5.2.1 Coagulação-Floculação	66
5.2.1.1 Determinação do Melhor pH de Floculação (série 1)	66
5.2.1.2 Determinação da Dosagem Ótima de Coagulante (série 1)	68
5.2.1.3 Determinação da Melhor Dosagem de Polímero (série 2)	71
5.2.1.5 Determinação do Melhor Gradiente e Tempo de Floculação (série 4)	77
5.2.1.6 Determinação do Volume de Lodo (série 5)	84
5.2.2 Ozonização do Efluente Bruto	86
5.2.2.1 Variação da Concentração de Ozônio	86
5.2.2.2 Variação da Concentração de Sulfato de Alumínio	88
5.3 ESTUDO EM CONTÍNUO: OZONIZAÇÃO E PILOTO DE FLOCULAÇÃO (ETAPA 2)	90
5.3.1 Ozonização	90
5.3.2 Piloto de Floculação – Condições Hidráulicas	91
5.3.2.1 Efluente Bruto (sem ozônio)	92
5.3.2.2 Efluente Ozonizado	93
5.3.2.2.1 Concentração de Aplicação: 7 mgO <sub>3</sub> /l	93
5.3.2.2.2 Concentração de Aplicação: 27 mgO <sub>3</sub> /l	95
5.3.2.2.3 Concentração de Aplicação: 7 mg/l de O <sub>3</sub> (efluente tratado biologicamente)	96
5.3.4 Redução de DQO, COD e Sólidos	101
5.3.4.1 DQO (Demanda Química de Oxigênio)	101
5.3.4.2 COD (Carbono Orgânico Dissolvido)	103
5.3.4.3 Sólidos Totais e Suspensos	104
5.4 ESTUDO EM DESCONTÍNUO: PÓS-OZONIZAÇÃO (ETAPA 3)	105
5.4.1 Estudo em Descontínuo	105

## **CAPÍTULO VI** **107**

<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>107</b>
--------------------------------------	------------

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>109</b>
-----------------------------------	------------

<b>ANEXOS</b>	<b>114</b>
---------------	------------

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Processamento dos tecidos de algodão e sintéticos e seus despejos</i>	5
<i>Figura 2 – Configuração esquemática da dupla camada elétrica.</i>	17
<i>Figura 3 – Diagrama de solubilidade do alumínio e do ferro em função do pH</i>	20
<i>Figura 4 – Mecanismo de agregação das partículas: (a) Floculação Pericinetica; (b) Floculação Ortocinetica; (c) Sedimentação Diferencial</i>	22
<i>Figura 5 - Comportamento da perda de carga em função da velocidade de aproximação</i>	29
<i>Figura 6 – Possíveis formas da estrutura molecular do ozônio devido a ressonância magnética</i>	34
<i>Figura 7 - Esquema geral da decomposição do ozônio, e suas reações</i>	34
<i>Figura 8 – Reatividade do ozônio em soluções aquosas</i>	35
<i>Figura 9 – Esquema da célula geradora de ozônio</i>	35
<i>Figura 10 – Velocidade ascensional das bolhas em função de suas dimensões</i>	37
<i>Figura 11 – Misturador Estático – módulos</i>	38
<i>Figura 12 – Tolerância do ser humano ao ozônio</i>	42
<i>Figura 13 – Esquema de propostas de tratamento</i>	45
<i>Figura 14 – Desenho esquemático do sistema piloto</i>	46
<i>Figura 15 – Unidades de reservação dos efluentes bruto e ozonizado</i>	48
<i>Figura 16 – Aparelho de JarTest, com amostras de efluente têxtil</i>	49
<i>Figura 17 – Aparelho de geração de ozônio</i>	52
<i>Figura 18 – Piloto de ozonização em descontinuo</i>	53
<i>Figura 19 – Piloto de ozonização com misturador estático</i>	56
<i>Figura 20 - Esquema de funcionamento da unidade de transferência de ozônio</i>	57
<i>Figura 21 – Piloto de ozonização com coluna de contato</i>	58
<i>Figura 22 – Piloto de floculação</i>	60
<i>Figura 23a – Bombas peristálticas, para dosagem de sulfato de alumínio e polímero</i>	61
<i>Figura 23b - Câmara de carga</i>	61
<i>Figura 24 - Redução da cor (absorvância) em função da dosagem de cal e do pH para tempos de decantação de 4 min (vs=1,75 cm/min) e 7 min (vs=1cm/min)</i>	66
<i>Figura 25 - Redução da turbidez em função da dosagem de cal e do pH para tempos de decantação de 4 min (vs=1,75cm/min) e 7 min (vs=1cm/min)</i>	67
<i>Figura 26 - pH de floculação em relação às aplicações de sulfato de alumínio e cal</i>	68
<i>Figura 27 – Redução da cor (absorvância) em função da dosagem de sulfato de alumínio e de cal para tempos de decantação de 4 min (vs=1,75cm/min) e 7 min (vs=1cm/min)</i>	69
<i>Figura 28 - Redução da turbidez em função da dosagem de sulfato de alumínio e de cal para tempos de decantação de 4 min (vs=1,75cm/min) e 7 min (vs=1cm/min)</i>	70
<i>Figura 29 - Redução da cor (absorvância) em função das dosagens de polímero para tempos de decantação de 2 min (vs=3,5cm/min) e 4 min (vs=1,75cm/min)</i>	72
<i>Figura 30 - Redução da cor (absorvância) em função das dosagens de polímero para tempos de decantação de 5,5 min (vs=1,27cm/min) e 7 min (vs=1cm/min)</i>	73
<i>Figura 31 - Redução da turbidez em função da dosagem de polímero para tempos de decantação de 2 min (vs=3,5cm/min) e 4 min (vs=1,75)</i>	74
<i>Figura 32 - Redução da turbidez em função da dosagem de polímero para tempos de decantação de 5,5 min (vs=1,27cm/min) e 7 min (vs=1cm/min)</i>	75
<i>Figura 33 - Redução da cor (absorvância) em função do gradiente de velocidade e tempo de mistura rápida, sem polímero e com polímero</i>	76
<i>Figura 34 - Redução da turbidez em função do gradiente e tempo de mistura rápida, sem polímero e com polímero</i>	77
<i>Figura 35 - Redução da cor (absorvância) em função do gradiente e tempo de floculação para tempos de decantação de 4 min (vs=1,75cm/min) e 7 min (vs=1cm/min), sem polímero</i>	78
<i>Figura 36 - Redução da cor (absorvância) em função do gradiente e tempo de floculação para tempos de decantação de 4 min (vs=1,75 cm/min) e de 7 min (vs=1cm/min), com polímero</i>	79
<i>Figura 37 - Redução da turbidez em função do gradiente e tempo de floculação para tempos de decantação de 4 min (vs=1,75cm/min) e 7 min (vs=1 cm/min), sem polímero</i>	80
<i>Figura 38 - Redução da turbidez em função do gradiente e tempo de floculação para tempos de decantação de 4 min (vs=1,75cm/min) e 7 min (vs=1cm/min), com polímero</i>	81
<i>Figura 39 – Redução média de cor (absorvância) e turbidez em função dos gradientes de velocidade e do tempo de decantação, com polímero (vs = 1,75cm/min, 1,27cm/min, 1cm/min e 0,7cm/min)</i>	82

<i>Figura 40 – Redução média de cor (absorvância) e turbidez em função dos gradientes de velocidade e do tempo de decantação, sem polímero (<math>v_s = 1,75\text{cm/min}</math>, <math>1,27\text{cm/min}</math>, <math>1\text{cm/min}</math> e <math>0,7\text{cm/min}</math>)</i>	83
<i>Figura 41 – Concentração de lodo em função do tempo de adensamento, com polímero e sem polímero</i>	84
<i>Figura 42 - Cones Imhof no início e no final da sedimentação (6 horas)</i>	85
<i>Figura 43 – Redução da cor do efluente ozonizado à 2,2 - 4,0 - 8,5 - 13,5 - 17,0 - 20,0 <math>\text{mgO}_3/\text{l}</math></i>	86
<i>Figura 44 - Redução da turbidez e da absorvância em relação a concentração de ozônio, sem polímero</i>	87
<i>Figura 45 - Redução da turbidez e da absorvância em relação a concentração de ozônio, com polímero</i>	87
<i>Figura 46 - Redução da absorvância e da turbidez em relação a dosagem de ozônio e de sulfato de alumínio, com polímero</i>	89
<i>Figura 47 - Redução da absorvância e da turbidez em relação a dosagem de ozônio e de sulfato de alumínio, sem polímero</i>	90
<i>Figura 48 - Redução da absorvância e da turbidez em relação ao tempo de funcionamento do piloto, com polímero e sem polímero</i>	92
<i>Figura 49 - Redução da absorvância e da turbidez do efluente pré-ozonizado (<math>7\text{mgO}_3/\text{l}</math>), com polímero e sem polímero</i>	94
<i>Figura 50 - Redução da absorvância e da turbidez do efluente pré-ozonizado (<math>27\text{mgO}_3/\text{l}</math>), com polímero e sem polímero</i>	95
<i>Figura 51 - Redução da absorvância e da turbidez do efluente pré-ozonizado (<math>7\text{mgO}_3/\text{l}</math>) tratado biologicamente, com polímero e sem polímero</i>	97
<i>Figura 52 – Resultados da absorvância entre os ensaios, sem polímero e com polímero</i>	98
<i>Figura 53 – Resultados da turbidez entre os ensaios, sem polímero e com polímero</i>	99
<i>Figura 54 – Cor (absorvância) e turbidez média de entrada e saída do piloto de floculação, e eficiência de remoção</i>	100
<i>Figura 55 - DQO (total e solúvel) de entrada e saída do piloto de floculação</i>	101
<i>Figura 56 - COD de entrada e saída do piloto de floculação</i>	103
<i>Figura 57 - Sólidos (totais e suspensos) de entrada e saída do piloto de floculação</i>	104
<i>Figura 58 – Redução da cor (absorvância) e da turbidez para o efluente decantado (7min), em relação a concentração de ozônio</i>	106

## ÍNDICE DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Processos de tratamento e faixas de eficiência normalmente conseguidas</i>	9
<i>Tabela 2 - Equações de equilíbrio de algumas espécies hidrolisadas do alumínio e do ferro</i>	19
<i>Tabela 3 - Valores de <math>a</math> e <math>n</math></i>	31
<i>Tabela 4 – Principais características médias do efluente em estudo</i>	65
<i>Tabela 5 – Características dos pontos escolhidos no diagrama de coagulação</i>	71

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\mu$  - Coeficiente de viscosidade dinâmica da água  
 $\nu$  - viscosidade cinemática  
 $\gamma$  - peso específico  
 $\rho$  - massa específica  
 $\varepsilon$  - porosidade do meio granular  
 $\Delta h_e$  - perda de carga no meio expandido  
A - Área transversal do reator  
 $Al_t$  - Concentração molar total de alumínio  
Ca - Número de Camp  
COD - Carbono Orgânico Dissolvido  
CODB - Carbono Orgânico Dissolvido Biodegradável  
COT - Carbono Orgânico Total  
d - diâmetro do grão  
 $d_1$  e  $d_2$  - tamanho das partículas  
 $d_s$  - densidade do grão  
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio  
DQO - Demanda Química de Oxigênio  
E - Eficiência de transferência de ozônio  
Ex - expansão  
 $Fe_t$  - Concentração molar total de ferro  
FIESC - Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina  
g - aceleração da gravidade  
G - Gradiente de Velocidade  
Ga - Número de Galileu  
GAC - Carvão Ativado Granular  
J - perda de carga  
 $K_w$  - Constante de Dissociação da Água  
L - Comprimento do meio granular



LEEA – Laboratório de Experimentação em Engenharia Ambiental  
LIMA – Laboratório Integrado de Meio Ambiente  
M – Massa específica do leite  
N – Número de contatos entre as partículas de flocos  
Ne – Número de Newton  
NPDOX – Halogenados Orgânicos Dissolvidos Não Purgável  
NTU – Unidade Nefelométrica de Turbidez  
O<sub>3</sub> – Fórmula molecular do gás ozônio  
P – Energia de entrada  
PAC – Cloreto de Polialumínio  
pH – Potencial Hidrogeniônico  
Qg – Vazão de gás  
Qef – Vazão de efluente  
Re – Número de Reynolds  
S – Área específica média dos grãos  
t – Tempo  
T – Tempo de detenção  
THM – Triahalometano  
TOA – Tecnologia de Oxidação Avançada  
UV – Ultravioleta  
v - velocidade  
V - Volume

## RESUMO

Na sua grande maioria, as estações de tratamento de efluentes têxteis são formadas por uma sequência clássica de processos, composta inicialmente pela coagulação-floculação, seguida de um processo biológico. Diversos problemas envolvem estas estações, principalmente o baixo nível de eficiência quanto a remoção de cor. A cor dos efluentes se dá devido aos corantes utilizados no processamento têxtil. O presente trabalho investigou através de estudos em laboratório, o tratamento de efluentes têxteis através da floculação em meio granular expandido, dos efluentes bruto, pré-ozonizado e tratado biologicamente. Para realizar a pesquisa foi utilizado um piloto de floculação constituído de três colunas de vidro dispostas em ordem crescente de diâmetro, recheadas com pequenas esferas (meio granular) de polietileno de 6 mm de diâmetro. O efluente recebe o coagulante (sulfato de alumínio) e o polímero (não iônico PRAESTOL 2500<sup>R</sup>) antes de entrar na primeira coluna (mistura rápida), passa pelas três colunas causando a expansão das esferas provocando assim a agitação do líquido para formação dos flocos. Após este processo, o efluente passa por um decantador onde acontece a decantação, e de onde é feita a coleta de amostras para análises, num tempo de decantação de 4 e 7 minutos. Como material de estudo, foi utilizado o efluente da Indústria Têxtil Damyller, situada no município de Nova Veneza, sul do estado. Ensaios de ozonização foram realizados para encontrar a dosagem mínima de ozônio que fosse efetiva para o tratamento, utilizando pilotos de ozonização. Ensaios de coagulação-floculação do efluente bruto determinaram a dosagem ótima de sulfato de alumínio (500 mg/l), de cal (600 e 300 mg/l) e de polímero (0,45 mg/l), sendo posteriormente avaliados em relação a remoção de cor e turbidez. Análises de DQO, COD e Sólidos foram realizadas com os efluentes bruto e ozonizado. Com base no trabalho experimental realizado, concluiu-se que para este efluente especificamente, o uso do polímero (auxiliar de coagulação), não promoveu melhores resultados; a pré-ozonização (7 mg/l) também não melhorou a eficiência de remoção dos parâmetros analisados, em relação aos resultados sem a ozonização; os melhores resultados em termos de redução de DQO e COD foram aqueles realizados com o efluente pré-ozonizado e tratado biologicamente, que foi de 80% sem polímero e de 89% com polímero para a DQO, e 75% sem polímero e de 78% com polímero para o COD. Em relação aos Sólidos Suspensos, o melhor tratamento foi com o efluente bruto (sem ozônio e sem polímero), com eficiência de remoção de 82%. Em termos de cor e turbidez, o melhor tratamento também foi para o efluente sem ozônio e sem polímero com eficiência de remoção de 98% para a cor e de 97% para a turbidez, para um tempo de decantação de 7 minutos, lembrando que o tempo de detenção no floculador foi de apenas 3 minutos.

## ABSTRACT

The great majority of textile effluent treatment stations are composed of a classic sequence of processes, consisting initially of coagulation-flocculation, followed by a biological process. A variety of problems are associated with these stations, principally the low efficiency in the removal of colour. The colour of the effluents is due to the dyes utilised in the textile processing. This work investigated through laboratory studies, the treatment of textile effluents through flocculation in an expanded granular medium, for raw, pre-ozonized and biologically treated effluents. To carry out the research a pilot flocculation study was utilised comprising three glass columns arranged in order of increasing diameter, filled with small polyethylene spheres (granular medium) of 6mm diameter. The effluent received the coagulant (aluminium sulphate) and the polymer (non-ionic PRAESTOL 2500) before entering the first column (mixing rapidly), and was passed through the three columns causing the expansion of the spheres provoking in this way the agitation of the liquid for the formation of the flocs. After this process, the effluent was transferred to a decanter where decantation occurred, and where samples were collected for analysis, with a decantation time of 4-7 minutes. For this study an effluent from Indústria Têxtil Damyller was utilised, which is situated in the municipality of Nova Veneza, in the south of the state. Ozonization tests were carried out in order to determine the minimum dose of ozone which would be effective in the treatment, utilising pilot ozonization plants. Coagulation-flocculation experiments carried out on the raw effluent determined the optimum dose of aluminium sulphate (500 mg/l), of lime (600 and 300 mg/l) and of the polymer (0,45 mg/l), this being evaluated afterwards in relation to the removal of colour and turbidity. Analyses for COD, DOC and solids were carried out on the raw and ozonized effluents. On the basis of the experimental work carried out, it has been concluded that for this specific effluent the use of the polymer (to aid coagulation) did not give better results; also pre-ozonization (7 mg/l) did not enhance the removal efficiency for the parameters analysed, in relation to the results without ozonization, the best results in terms of reduction of COD and DOC were those carried out on pre-ozonized and biologically treated effluent, which were 80% without polymers and 89% with polymers for COD, and 75% without polymers and 78% with polymers for DOC. In relation to the suspended solids, the best treatment was with raw effluent (without ozonization and without polymers), with a removal efficiency of 82%. In terms of colour and turbidity, the best treatment was also for the effluent without ozone and without polymers with a removal efficiency of 98% for colour and 97% for turbidity for a decantation time of 7 minutes, remembering that the detention time in the flocculator was only 3 minutes.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUÇÃO

As indústrias têxteis constituem fator de grande importância na economia brasileira. O estado de Santa Catarina é o segundo maior polo têxtil em volume de produção do Brasil, e respondem por aproximadamente 25% do valor da transformação industrial catarinense (FIESC, 1996).

O processamento têxtil é gerador de grande quantidade de despejos altamente poluidores, contendo elevada carga orgânica, cor acentuada e compostos químicos tóxicos ao homem e ao meio ambiente.

Estes processos e despejos gerados pela indústria têxtil variam à medida que a pesquisa e o desenvolvimento produzem novos reagentes, novos processos e novas técnicas, e também de acordo com a demanda do consumo por outros tipos de tecidos e cores. Numerosas operações são necessárias a fim de dar ao tecido o máximo de propriedades, gerando assim, em cada etapa, diferentes despejos.

Os efluentes da indústria têxtil apresentam portanto uma grande variação na sua composição. A vazão pode variar entre 50 a 400 m<sup>3</sup> por tonelada de tecido processado; existe uma gama muito grande de corantes que são empregados em função da matéria têxtil trabalhada; os auxiliares de fabricação são diversos; tudo isso torna impossível de se estabelecer qual o processo de tratamento a ser dado aos efluentes sem efetuar ensaios de grande escala.

Os tratamentos convencionais, entre os quais estão a coagulação-química e lodos ativados, geram em média de três a cinco quilogramas de lodo por metro cúbico de efluente tratado (RAIZER, 1996).

A remoção da cor dos efluentes têxteis é um dos maiores problemas enfrentados pelas indústrias devido a variedade de corantes utilizados no processamento têxtil.

A técnica da ozonização (que não gera lodo), tem sido muito usada nos últimos anos devido seu alto potencial de oxidação (CAMEL e BERMOND, 1998). O ozônio reage facilmente com a maior parte dos corantes utilizados nas indústrias têxteis. A ozonização

combinada com a coagulação-floculação representa uma eficiente alternativa para o tratamento de efluentes têxteis (LIN e LIU, 1994b).

A floculação é utilizada como fase preparatória na remoção de partículas em suspensão. Embora uma estação de tratamento seja um sistema integrado de diversos processos unitários, vem-se firmando atualmente a opinião de que a floculação é o mais importante de todos (RICHTER, 1991). Quanto mais compartimentos em série possuir um floculador melhor será sua eficiência; o meio granular simula vários compartimentos em série e ocupa menos espaço e menor tempo de detenção do que tanques usados em estações convencionais.

A intenção de encontrar tecnologias de tratamento para aplicação em estações compactas, proporcionou recentes evoluções na floculação em meio granular, como por exemplo os estudos da floculação em meio granular expandido (SENS e MARTIN, 1990 ; SENS e HANSEN, 1995).

O presente trabalho é uma sequência das pesquisas realizadas por WOLFF (1997), MELO FILHO (1997), BARTHEL (1998), SALES (1999) sobre tratamento de efluentes têxteis, e tem como propósito, demonstrar através de estudos pilotos desenvolvidos em laboratório, a eficiência do tratamento através da floculação em meio granular expandido, com o efluente pré-ozonizado, não ozonizado (bruto), e tratado biologicamente.

## CAPÍTULO II

### 2. OBJETIVOS

#### 2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Estudo de alternativas de tratamento físico-químico para efluentes têxteis, empregando técnicas de floculação em meio granular expandido e oxidação com ozônio.

#### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar o comportamento do floculador de leito expandido no tratamento de efluentes têxteis.
- Redução do tempo de detenção no floculador.
- Estudo de transferência de  $O_3$  através de misturador estático com o objetivo de diminuir o tempo de detenção na câmara de ozonização.
- Estudos dos processos integrados: físico-químico (floculação granular / ozônio) e biológico (leito fluidizado, aeróbico).

## CAPÍTULO III

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 A INDÚSTRIA TÊXTIL

Em termos de sua produção e o número de trabalhadores que ocupa, a indústria têxtil é uma das maiores do mundo. As facilidades de produção variam desde plantas altamente automatizadas até pequenas instalações artesanais, mas todas se caracterizam por requerer grandes quantidades de água, corantes e produtos químicos utilizados ao longo de uma complexa cadeia produtiva (SANIN, 1997).

Santa Catarina destaca-se a nível nacional no setor de indústrias têxteis, possuindo um amplo e diversificado parque fabril, sendo o segundo maior polo têxtil em volume de produção do Brasil.

Os efluentes gerados pelas unidades industriais atualmente são tratados por processos físico-químicos e biológicos convencionais, os quais apresentam bons resultados na redução carbonácea, mas têm como inconveniente a alta produção de lodo e a necessidade de disponibilização de grandes áreas para implantação do processo de tratamento e de aterros sanitários industriais para disposição do lodo. Além disso, esses efluentes caracterizam-se por uma grande variação de cargas, devido a própria variação do processo industrial que envolve a sequência de produção e acabamento têxtil, onde são utilizados corantes, tensoativos, espessantes e produtos químicos diversos que tornam o efluente muito complexo, geralmente com concentrações de DBO e DQO altas, e com diferentes características de biodegradação.

##### 3.1.1 Processamento Têxtil

Os produtos têxteis são derivados da manufatura de fibras que podem ser naturais ou sintéticas. As duas principais fibras naturais são a lã e o algodão, e as principais fibras sintéticas incluem o poliéster, o rayon, o nylon, o poliacrílico e as poliamidas.

As fibras têxteis naturais podem ser classificadas em vegetais e animais, e as fibras sintéticas (ou químicas) classificadas como de polímeros naturais ou de polímeros sintéticos.

As etapas de um processamento têxtil normalmente são as seguintes:

- Matéria-prima.
- Preparação da fição e fição.
- Tingimento dos fios.
- Engomagem.
- Tecelagem.
- Chamuscagem e desengomagem.
- Acabamento.
- Mercerização.
- Secagem.
- Tinturaria.
- Estamparia.
- Acabamento.

A figura 1 mostra o fluxograma do processo industrial para o algodão e tecidos sintéticos, como também os despejos provenientes deste processo.

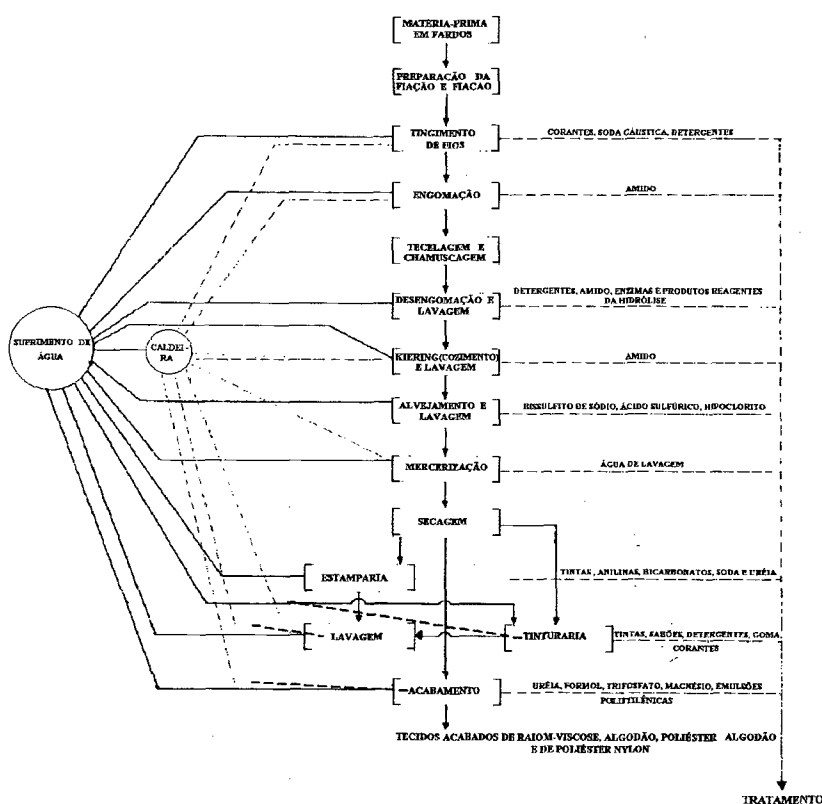


Figura 1 – Processamento dos tecidos de algodão e sintéticos e seus despejos

Fonte: BRAILE e CAVALCANTI, 1993



### 3.1.2 Natureza do Efluente Têxtil

O processamento industrial e os despejos líquidos gerados pela indústria têxtil variam à medida que a pesquisa e o desenvolvimento produzem novos reagentes, novos produtos e técnicas, e também de acordo com a demanda do consumo por outros tipos de tecidos e cores. Numerosas operações são necessárias a fim de dar ao tecido o máximo de propriedades, gerando assim em cada etapa diferentes despejos (BRAILE e CAVALCANTI, 1993).

A principal origem dos efluentes gerados pelas indústrias têxteis é proveniente dos processos de lavagem ou alvejamento das fibras, de tingimento, e de acabamento. Dado o grau de variedade de fibras, corantes, auxiliares e produtos de acabamento em uso, esses processos geram efluentes de grande complexidade e diversidade química (VANDEVIVERE et al., 1998).

Dependendo da origem, os efluentes têxteis variam consideravelmente na cor, no conteúdo de sólidos suspensos e na concentração de DQO.

A indústria têxtil consome considerável quantidade de água no seu processo. A água é principalmente empregada nas operações de tingimento e acabamento no qual os tecidos são tingidos e processados para o produto final. Cerca de 100 m<sup>3</sup> de água são consumidos em média para cada tonelada de tecido processado.

Tem sido calculado que dos 100 m<sup>3</sup> de água consumidos pela indústria têxtil, 100 kg de DQO são emitidos por tonelada de produção (BERGNA et al., 1999).

Considerando o volume e a composição, o efluente gerado pela indústria têxtil é taxado como o mais poluidor entre todo o setor industrial.

### 3.1.3 A Cor nos Efluentes Têxteis

A cor forte é a característica mais notória do efluente têxtil.

O problema da cor está associado aos corantes, principalmente aos corantes solúveis em água.

O setor têxtil no Brasil consome cerca de 20 toneladas por ano de corantes, deste montante 20% se perde nos resíduos gerados pelo processamento têxtil.

Os corantes são moléculas orgânicas altamente estruturadas e de difícil degradação biológica (LIN e LIU, 1994b).

Alguns corantes solúveis, como os diretos, básicos, muito ácidos e pré-metalizados são adsorvidos pelo processo de lodos ativados, e portanto não criam problemas posteriores.

Os corantes insolúveis, tais como pigmentos dispersos, tintas, sulfurosos ou azóicos, são eliminados pelo tratamento de sedimentação e somente entram em águas superficiais por descarga direta.

Os corantes reativos são muito utilizados na indústria têxtil, mas devido a boa solubilidade em água e pequena biodegradabilidade, sua eliminação é difícil tanto pelo processo físico-químico como pelo biológico (KARCHER et al., 1999).

Os corantes reativos constituem a maior classe de corantes (azóicos), possuindo uma grande variedade de cores, são muito utilizados devido a sua capacidade de combinação química com fibras celulósicas (algodão, viscose, linho, lã e seda). Além disso, possuem características favoráveis para rapidez da reação, facilidade de operação e baixo consumo de energia na aplicação (MARTINS, 1997).

As moléculas dos corantes apresentam estruturas aromáticas que absorvem luz visível e que fixa os corantes para dentro das fibras (cromóforos). Existem 12 classes de grupos cromóforos, a mais comum é a do tipo azo, que é o tipo de corante têxtil mais fabricado (60 a 70 % do total).

Os corantes azóicos são compostos que apresentam o grupo azo ( $-N=N-$ ) em sua composição, que se unem principalmente aos grupos benzeno e naftaleno. Em alguns casos eles também se unem à heterociclos aromáticos. Aminas primárias aromáticas ou heteroaromáticas são usadas para produzir corantes azo.

A norma técnica NBR – 5766 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), estabelece a classificação de corantes orgânicos naturais e artificiais comercializados no Brasil, baseada na sistemática empregada no “Textile Chemists and Colourists”. Os corantes orgânicos naturais e artificiais são classificados segundo a cor (amarelo, laranja, vermelho, violeta, azul, verde, castanho, preto e branco), classe de aplicação e grupo químico (MELO FILHO, 1997).

Operações normais de tingimento e acabamento têxtil são tais que os corantes usados no processo podem variar dia a dia, e em alguns casos podem variar várias vezes num dia. Trocas frequentes de corantes empregados em um processo de tingimento causam consideráveis variações nas características do efluente, particularmente do pH, cor e concentração de DQO (GURNHAM, 1965, citado por LIN e CHEN, 1997).

Segundo os mesmos autores, grande variação de pH é prejudicial porque a tolerância do pH nos sistemas de tratamento convencionais, tanto biológico como químico, é muito limitada. Portanto, sem um pH adequado, a operação normal do processo de tratamento se torna impossível.

### 3.1.4 Tratamento dos Efluentes Têxteis

A indústria têxtil tem uma natureza variável em termos de material bruto utilizado, técnicas empregadas, produtos químicos aplicados, operações e processos envolvidos. A reflexão desta variação pode ser observada na caracterização e tratabilidade do seu efluente. As diferenças na caracterização e tratabilidade dos efluentes têxteis de diferentes origens não podem ser avaliadas sem dar referência ao processo de produção destes efluentes, e a única maneira de resolver isto é considerar cada indústria como um caso em separado (BABUNA et al., 1999).

O tratamento dos efluentes têxteis deve ser realizado para garantir um efluente final dentro dos padrões previstos na Legislação Ambiental, preservando assim, o meio aquático/solo receptor. A escolha do processo ou da sequência do processo de tratamento, depende de uma série de fatores, tais como: características do efluente, qualidade do efluente após o tratamento, custo, disponibilidade de área e disponibilidade tecnológica.

Os efluentes têxteis apresentam uma variação muito grande na sua composição devido aos vários tipos de corantes e produtos químicos utilizados, e isto faz o seu tratamento ser um problema complexo.

Como a cor forte é a característica visual mais notória do efluente têxtil, a descoloração tem sido parte integral do processo de tratamento destes efluentes.

#### 3.1.4.1 Processo de Tratamento

Conforme a Nota Técnica sobre Tecnologias de Controle para a Indústria Têxtil (CETESB, 1991), a sequência do processo de tratamento mais utilizada para os efluentes têxteis, assim como a eficiência de alguns parâmetros conseguida no tratamento, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Processos de tratamento e faixas de eficiência normalmente conseguidas

TIPO E UNIDADE DE TRATAMENTO	FAIXA DE REMOÇÃO (%)				
	DBO <sub>5</sub>	DQO	Sólidos Suspensos Totais	Óleos e Graxas	Cor
<b>TRATAMENTO PRIMÁRIO</b>					
Peneiramento	0 - 5	-	5 - 20	-	-
Equalização	0 - 20	-	-	-	-
Neutralização	-	-	-	-	-
Coagulação química (a remoção depende dos produtos químicos e das dosagens utilizadas)	40 - 70	40 - 70	30 - 90	90 - 97	0 - 70
Flotação	30 - 50	20 - 40	50 - 60	90 - 98	-
Sedimentação primária	5 - 15	-	15 - 60	-	-
<b>TRATAMENTO SECUNDÁRIO</b>					
Lodos ativados convencionais + clarificação	70 - 95	50 - 70	85 - 90	0 - 15	A remoção de cor em tratamento biológico não foi documentada.
Aeração prolongada + clarificação	70 - 94	50 - 70	85 - 95	0 - 15	
Lagoa aerada e clarificação	60 - 90	45 - 60	85 - 95	0 - 10	
Lagoa aeróbia	50 - 80	35 - 60	50 - 60	0 - 10	
Filtros biológicos	40 - 70	20 - 40	-	-	
Lodos ativados em dois estágios	90	-	-	-	
Lodos biológicos em dois estágios	90	-	-	-	
Filtros biológicos de alta taxa + lodos ativados	90	-	-	-	
<b>TRATAMENTO TERCIÁRIO</b>					
Coagulação química	40 - 70	40 - 70	30 - 90	90 - 97	0 - 70
Filtração em meio misto	25 - 40	25 - 40	80	-	-
Adsorção em carvão ativado	25 - 40	25 - 60	25 - 40	-	80 - 90
Cloração	0 - 5	0 - 5	-	-	0 - 5
Ozonização	-	30 - 40	50 - 70	-	70 - 80
Lagoa de polimento	50	-	-	-	-

Fonte: CETESB. Nota Técnica Sobre Tecnologias de Controle Para Indústria Têxtil. NT 22. São Paulo, 1991

### 3.1.4.2 Remoção da Cor

Como já foi visto, o problema da cor em relação à indústria têxtil, está associado ao uso de corantes solúveis em água, como os corantes reativos e ácidos, que são adsorvidos em quantidade insignificante (menos de 25%) e, portanto, saem no efluente das estações de tratamento. A situação desses corantes portanto, é crítica, devido a sua baixa fixação sobre as fibras.

O maior problema dos corantes é a sua remoção dos efluentes. Sua concentração é menor do que muitos outros produtos químicos encontrados nos efluentes, mas sua cor é visível até à baixas concentrações (SARASA et al., 1998).

Existem muitos processos para a descoloração de efluentes têxteis: redução com hidrossulfito, oxidação com hipoclorito, floculação com polieletrólitos, sedimentação com

sulfato de alumínio e sais férricos, hiperfiltração (osmose inversa), resinas de intercâmbio iônico, adsorção sobre carvão ativado, ozonização, UV – oxidação catalisada, oxidação com ar úmido, entre outros.

A remoção da cor por carvão ativado, peróxido de hidrogênio, hipoclorito de sódio e outros agentes químicos tem sido amplamente praticados nas indústrias têxteis. Entretanto, o custo dessas operações de polimento usando estes produtos químicos é alto.

A combinação da cor e grande conteúdo de sólidos dissolvidos resulta em uma alta turbidez. A cor do efluente, se não removida, poderá causar um grande impacto negativo no ambiente aquático causado pela sua turbidez e pela grande força poluidora (LIN e LIN, 1993).

A seguir citaremos os três processos mais utilizados para a descoloração de efluentes têxteis.

#### 3.1.4.2.1 Remoção da Cor por Adsorção

O carvão ativado é o adsorvente mais usado para a remoção da cor. Ele é bastante efetivo para descolorir efluentes que contenham corantes reativos, básicos e ácidos, mas relativamente ineficaz na remoção de alguns corantes dispersos, tintas e pigmentos.

São utilizadas duas formas de carvão ativado no tratamento de efluentes têxteis: o carvão ativado granular e o carvão ativado em pó.

O uso do carvão ativado granular apresenta desvantagens devido sua forma lenta de adsorção ( $1 - 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ ), seu custo, e também pelo fato de algumas vezes ser necessário um pré-tratamento quando as concentrações de sólidos suspensos forem maiores que 50 mg/l, pois podem se acumular nos leitos de carvão e reduzir a eficiência da descoloração. Este tipo de carvão é aplicável em processos descontínuos e com baixas concentrações de cor (SANIN, 1997).

Um outro adsorvente promissor para a remoção de corantes reativos é o “cucurbituril”, que é um produto de condensação cíclica de “glycoluril” e formaldeído. Este composto (formado por 6 filas sistemáticas) tem este nome devido sua forma se parecer com uma abóbora, que pertence a família das “cucurbitaceae”. Experimentos recentes mostraram sua extraordinária capacidade de adsorção para vários tipos de corantes têxteis (KARCHER, 1999).

### 3.1.4.2.2 Remoção da Cor por Coagulação-Floculação

De acordo com SANIM (1997), a remoção da cor do efluente têxtil é uma técnica físico-química que acontece em três etapas distintas: coagulação, floculação e separação de líquidos e sólidos.

Coagulação - floculação: a coagulação é conseguida mediante o uso de hidróxido de cálcio e sais metálicos polivalentes como o sulfato férrico, cloreto férrico e sulfato de alumínio. O hidróxido reage com o sal metálico para formar um hidróxido insolúvel, volumoso, sobre o qual se adsorve a cor. Sem dúvida, esses complexos inorgânicos não são totalmente efetivos na remoção da cor residual de certos tipos de corantes (ácidos e reativos), por isso, podem ser utilizados coagulantes do tipo polieletrólitos, os quais são usados sozinhos ou em combinação com sais metálicos.

Separação de líquidos e sólidos: os flocos são removidos da fase aquosa por um dos seguintes métodos: sedimentação por gravidade, flotação, centrifugação e filtração.

Uma remoção de cor insuficiente, é resultado de uma fraca floculação, devido a certos tipos de corantes (reativos ou ácidos).

Os corantes catiônicos não coagulam bem, fazendo sua remoção pelo processo físico-químico ser impossível. Os corantes ácidos, diretos, mordentes e reativos normalmente coagulam, mas os flocos resultantes são de baixa qualidade e não sedimentam bem, mesmo depois da introdução de um floculante. Os corantes de enxofre e dispersos coagulam bem e sedimentam facilmente, devido a boa formação e qualidade dos flocos. Com isso a remoção da cor é praticamente completa.

A maioria das indústrias têxteis são equipadas com tratamentos que combinam processo biológico e processo físico-químico. Quanto maior a relação DQO/DBO<sub>5</sub>, menor a biodegradabilidade do efluente (VLYSSIDES e ISRAILIDES, 1997).

A remoção da cor pode ser obtida de 40 a 50% devido a biodegradação e a adsorção dos corantes no lodo floculado. Com isso, a remoção da DQO pode ser alcançada em 70%.

Processos físico-químicos sozinhos não podem alcançar resultados satisfatórios, mesmo com a adição de coagulantes que podem aumentar a remoção da cor consideravelmente. A remoção da cor de corantes insolúveis é insuficiente, e a remoção da DQO é moderadamente eficiente (50%). Além disso, esta alternativa envolve um grande consumo de reagentes e substancial produção de lodo. Uma combinação de processos biológico e físico-químico removerá mais do que 85% da DQO. Um processo de tratamento complementar é necessário para remover a cor e, se possível a DQO residual.

O uso de coagulantes específicos para aplicação de remoção de cor pode ser considerado. A eficiência de remoção pode melhorar, mas o resultado ainda é insuficiente. A mesma observação pode ser feita considerando o poderoso carvão ativado, que pode ser usado como um complemento para o tratamento biológico ou físico-químico. Haverá um melhor desempenho somente para soluções com baixa cor residual (MARMAGNE e COSTE, 1996).

O processo de coagulação pode descolorir efetivamente os efluentes que contenham corantes insolúveis, como os dispersos. Entretanto, este processo não é efetivo para corantes solúveis, como os reativos. Os corantes solúveis podem ser descoloridos efetivamente pelo processo de oxidação tal como a azonização, já não sendo efetivo para os corantes insolúveis. O reagente Fenton tem mostrado uma efetiva descoloração dos corantes insolúveis (PAK e CHANG, 1999).

#### 3.1.4.2.3 Remoção da Cor por Membranas

Os processos com membranas incluem várias técnicas, nas quais a pressão é utilizada para passar o efluente sobre uma membrana semi-permeável. Essa membrana permite que o efluente atravesse, mas impede a passagem das substâncias solúveis que estão contidas nele. Podemos distinguir quatro processos:

- **Microfiltração:** as membranas retêm somente partículas maiores de  $0,1 \mu$ . É usada em clarificação ou em pré-filtração.
- **Ultrafiltração:** permitem que passem moléculas pequenas e eletrólitos, e retêm substâncias orgânicas de alto peso molecular dissolvidas em água. As moléculas de corantes se agregam em presença de eletrólito, podendo-se conseguir uma boa retenção.
- **Nanofiltração:** retêm substâncias orgânicas de baixo peso molecular (300 g/mol ou menos) e sais polivalentes. Sais simples atravessam a membrana.
- **Osmose inversa (hiperfiltração):** tem poros muito finos e é capaz de reter sais simples.

As membranas usadas na nanofiltração ou ultrafiltração são as mais convenientes para o tratamento de efluentes têxteis (SANIN, 1997).

#### 3.1.4.2.4 Remoção da Cor por Ozonização

A ozonização é uma nova técnica que tem sido sugerida na literatura recente como uma potencial alternativa para o objetivo da descoloração.

Os efluentes da indústria têxtil são muito difíceis de se tratar, devido principalmente a grande variação das características destes efluentes. Muitos trabalhos têm sido realizados usando o ozônio como agente oxidante para a sua descoloração (LIN e LIU, 1994a).

A ozonização representa talvez, um dos mais recentes métodos já testados para a descoloração do efluente têxtil. Investigações anteriores tem indicado que existe uma carência de estudos mais sistemáticos de descoloração desses efluentes. Além disso, poucos trabalhos têm sido feitos para a descoloração de efluente têxtil combinando ozonização com coagulação química. A principal razão para considerar o método combinado é devido ao fato de que os tratamentos químico, biológico e a ozonização sozinhos não são suficientes para a descoloração, redução da DQO e sólidos suspensos. Uma redução da DQO de até 70% pode ser conseguida, quando a ozonização do efluente é acompanhada de coagulação química (LIN e LIN, 1993).

Num primeiro momento a ozonização é empregada principalmente para quebrar as moléculas de corantes, e depois para a descoloração. Depois de ozonizado, o efluente recebe os outros tratamentos, podendo ser o físico-químico e/ou o biológico.

Corantes orgânicos detectados no efluente têxtil são compostos que contêm vários núcleos aromáticos. O pré-tratamento com ozônio é um método promissor de oxidação destes compostos transformando-os em degradáveis. Embora muitos trabalhos têm sido feitos com a oxidação pelo ozônio, bem pouco é sabido sobre a cinética da ozonização e seus produtos da reação com os corantes (LIAKOU et al, 1997).

A ozonização no final do tratamento, está sendo também cada vez mais utilizada para a eliminação da cor e outras substâncias persistentes.

O ozônio aparece portanto, como uma solução universal que oferece eficiência satisfatória. Produz um efluente com pouca cor, baixa DQO, e adequado para lançar no meio ambiente ou retornar ao processo.



## 3.2 COAGULAÇÃO - FLOCULAÇÃO

A coagulação e a floculação são processos físico-químicos unitários usados para agregar pequenos colóides e partículas dissolvidas em flocos maiores que podem ser facilmente sedimentados por gravidade e em seguida, removidos (SOBRINHO et al., 1996).

### 3.2.1 Coagulação

A coagulação é definida como o processo de desestabilização da carga elétrica das partículas em suspensão e colóides, que provocam a cor e turbidez no meio líquido (KAWAMURA, 1996).

Esse processo acontece com a adição de um coagulante e sua eliminação envolve conhecimentos sobre a estabilidade das partículas, a química da coagulação e cinética das reações.

Partículas em suspensão e colóides, como microrganismos em geral, apresentam-se com carga negativa no meio líquido, impedindo a aproximação das mesmas. Por isso faz-se necessário alterar a força iônica do meio, através da adição de sais de alumínio ou de ferro, ou de polímeros sintéticos, caracterizando o fenômeno da coagulação.

Normalmente os colóides de um efluente têxtil, apresentam cargas altamente negativas (ADIN, 1999).

A coagulação consiste basicamente de dois processos: o primeiro químico, que consiste da reação do coagulante com o meio líquido e a consequente formação de espécies químicas, a partir da hidrólise do coagulante aplicado; o segundo físico, que consiste no transporte das espécies hidrolisadas para interagir com outras espécies (impurezas e outros) presentes no meio. É um processo muito rápido, processando-se dentro de poucos segundos, e depende das características do líquido, tais como: pH, temperatura, alcalinidade, cor, turbidez, sólidos totais dissolvidos, força iônica, presença de metais, tamanho e distribuição das partículas em suspensão e em estado coloidal, e da intensidade de agitação.

Considera-se a coagulação como o resultado da ação de quatro mecanismos distintos: compressão da camada difusa, adsorção - neutralização, varredura, e adsorção-formação de ponte (DI BERNARDO, 1993).

Compressão da camada difusa: se dá pela introdução de um eletrólito indiferente num sistema coloidal causando um aumento na densidade de cargas na camada difusa diminuindo

a esfera de influência das partículas, ocorrendo a coagulação. Concentrações elevadas de íons positivos e negativos acarretam acréscimo do número de íons na camada difusa que, para manter-se eletricamente neutra, tem seu volume reduzido, de tal modo que as forças de Van der Waals sejam dominantes, eliminando a estabilização eletrostática.

Adsorção e neutralização de cargas: devido às interações coagulante/solvente, a adsorção ocorre na interface colóide/líquido. Esse mecanismo é muito importante quando o tratamento é realizado por meio de filtração direta, onde não há necessidade de produção de flocos para posterior sedimentação, mas de partículas desestabilizadas que serão retidas no meio filtrante.

Varredura: a formação de precipitados do tipo  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ou  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  poderá ocorrer dependendo da quantidade adicionada destes sais, do pH da mistura e da concentração de alguns tipos de íons no meio líquido. As partículas coloidais são envolvidas pelos precipitados e, como este mecanismo não depende da neutralização da carga dos colóides, a condição ótima da coagulação pode não corresponder àquela em que é mínimo o potencial zeta.

Adsorção e formação de pontes: quando são utilizados polímeros, que são compostos orgânicos sintéticos ou naturais, caracterizados por grandes cadeias moleculares e que apresentam sítios ionizáveis ao longo dessas cadeias, o que lhes permite serem utilizados como coagulantes. Os polímeros com estas propriedades podem ser classificados como: catiônicos (sítios ionizáveis positivos), aniônicos (sítios ionizáveis negativos), não iônico (não apresenta sítios ionizáveis), e anfótero (sítios ionizáveis negativos e positivos).

A coagulação química é aplicada como pré, pós tratamento ou como principal processo para o tratamento de efluentes das indústrias têxteis, entretanto, há o problema associado com a grande quantidade de lodo gerado neste processo.

### 3.2.1.1 Sistema Coloidal

Os sistemas coloidais podem ser classificados em hidrofóbicos ou instáveis (argilas, microrganismos e óxidos metálicos), e hidrófilos ou estáveis (proteínas, amidos, sabões, detergentes sintéticos), de acordo com a condição de permanência ou não dessa estabilidade.

A estabilidade depende da resultante final das forças de atração e repulsão que agem entre as moléculas.

Entre as propriedades dos colóides que influem na coagulação estão a hidrofobia, hidrofília e a mobilidade eletroforética.

### 3.2.1.1.1 Partículas Coloidais

As partículas coloidais são classificadas pelos seus tamanhos e podem variar de 1,0 nm a 1,0  $\mu\text{m}$ . As dispersões coloidais mais comumente encontradas no meio aquático são as emulsões (dispersão líquido-líquido) e suspensões (dispersão sólido-líquido).

### 3.2.1.1.2 Estabilidade dos Colóides

A estabilidade dos colóides depende da resultante final das forças de atração e repulsão que agem entre as partículas coloidais. As forças de atração conhecidas como “Van der Waals” são causadas pela interação de partículas dipolares permanentes ou induzidas, e as forças de repulsão são fornecidas pelo potencial zeta.

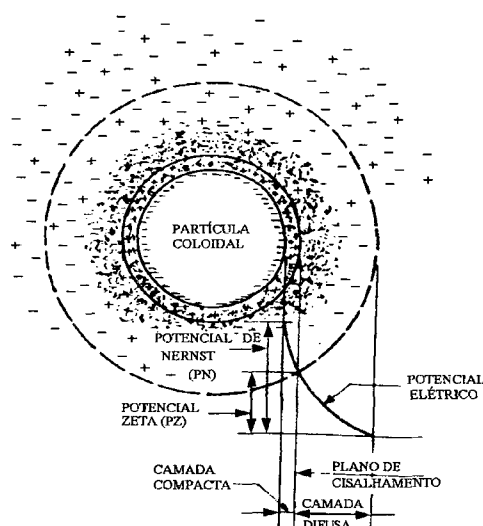
Segundo BENNEFIELD et al., 1982 (citado em DALSSASSO, 1999), a carga elétrica das partículas, fator responsável pela estabilidade coloidal, pode ser adquirida através das imperfeições na estrutura cristalina, ou da adsorção de íons da solução na superfície das mesmas.

Devido a esses processos, através dos quais os colóides se apresentam com carga de superfície negativa, ocorre um balanço com íons de carga contrária presentes no líquido. Como a superfície da partícula é negativa há um acúmulo de íons positivos na região da interface (sólido-líquido) formando, juntamente com a carga negativa da partícula, a *Dupla Camada Elétrica*, também denominada *Camada Compacta*. Íons negativos se aproximam da camada compacta e atraem íons positivos, resultando a *Camada Difusa*, que engloba a primeira. Na verdade, a camada difusa resulta da atração de íons positivos, repulsão eletrostática de íons negativos e difusão térmica.

Esta característica de difusão de íons de carga contrária à da partícula, foi primeiramente introduzida por Helmholtz, e reconhecida por Gouy e Chapman por volta de 1910, e por Stern, em 1924. O modelo proposto por Stern pode ser utilizado para descrever a distribuição do potencial elétrico na superfície coloidal, como mostra a figura 2.

Tem-se portanto, uma concentração elevada de íons positivos próximos à superfície do colóide, também denominada *Camada de Stern*, a partir da qual se forma a camada difusa, na qual a concentração de íons é menor. O potencial elétrico criado pela presença do colóide diminui com a distância, a partir da superfície do mesmo, onde é máximo e denominado *Potencial de Nerst*. Segundo Stern existe uma distância mínima entre a superfície do colóide e os íons de carga contrária (positivos), no qual o potencial elétrico decresce linearmente; em seguida a diminuição resulta exponencial passando pela fronteira entre a camada compacta e a

difusa, local denominado *Potencial Zeta*, que está associado à aplicação da diferença de potencial em uma amostra de líquido contendo colóides negativos de tal forma que uma certa porção do meio, em torno da partícula, caminha junto com esta ao eletrodo positivo, caracterizando o *Plano de Cisalhamento* (DI BERNARDO, 1993).



*Figura 2 – Configuração esquemática da dupla camada elétrica.*

Fonte: DI BERNARDO, 1993.

### 3.2.1.2 Mistura Rápida

O sistema de mistura rápida é uma parte integrante da coagulação. O objetivo da mistura rápida é, rapidamente e uniformemente dispersar os coagulantes no meio líquido. Ocorre sob forte agitação e altos gradientes de velocidade  $G$ , na ordem de 350 a 750  $s^{-1}$  (geralmente usado como padrão para a mistura rápida).

Na mistura rápida, para uniformemente dispersar os colóides em 1 ou 2 segundos, o potencial zeta dos mesmos precisa ser reduzido. Se a mistura rápida for inadequada, o coagulante não será uniformemente disperso e uma grande quantidade de massa líquida não será coagulada, resultando em uma coagulação insuficiente. A eficiência da coagulação e floculação é ditada pela seleção do tipo de coagulante, da dosagem do coagulante, e de uma mistura rápida adequada (KAWAMURA, 1996).

A duração da mistura rápida é crítica porque os coagulantes sofrem hidrólise em fração de segundos e as espécies de múltipla valência se transformam rapidamente em metais complexos, que devem ser uniformemente dispersos no meio, de 1 a 1,5 segundos após serem introduzidos, para alcançar uma coagulação efetiva antes do processo de floculação.

Para se obter o melhor tempo de mistura rápida, ensaios de Jar Test são realizados. Sem uma efetiva mistura rápida, o processo de coagulação é ineficaz.

### 3.2.1.3 Coagulantes

A escolha do coagulante e sua aplicação é muito importante no tratamento dos efluentes industriais.

Os coagulantes podem ser classificados em polieletrólitos ou auxiliares de coagulação e coagulantes metálicos (LEME, 1990).

Os coagulantes mais empregados são os inorgânicos (sais de alumínio e ferro), como por exemplo o sulfato de alumínio, o cloreto férrico e o sulfato férrico. São também utilizados os coagulantes orgânicos com densidade de carga positiva também chamados de polímeros catiônicos, que podem ser sintéticos ou naturais (quitosana por exemplo).

A diferença entre os coagulantes metálicos e os polímeros catiônicos está na sua reação hidrolítica com a água.

Nos polieletrólitos, as cadeias polimerizadas já estão formadas quando eles são adicionados no meio líquido.

Nos coagulantes metálicos, a polimerização se inicia no contato com o meio líquido, vindo a seguir a etapa de adsorção dos colóides existentes no meio.

O sulfato de alumínio  $[Al_2(SO_4)_3 \cdot x H_2O]$  é o coagulante mais usado, devido ao seu provado desempenho em tratar água e esgoto de características diferentes e com baixo custo. Recentemente, o cloreto de polialumínio (PAC) tem sido bastante utilizado em estações de tratamento em todo o mundo. É uma forma polimerizada de alumínio. A vantagem deste em relação ao sulfato de alumínio é devido a eliminação parcial do processo de polimerização que ocorre depois que o coagulante é adicionado no meio líquido (TAN et al., 2000).

#### 3.2.1.3.1 Comportamento Químico do Alumínio e do Ferro

Quando um sal de alumínio ou ferro é adicionado em um meio aquoso, ocorre inicialmente a sua dissociação, seguida pela reação com a água, de modo a permitir a formação de espécies mononucleares e polinucleares. Numerosos estudiosos têm-se dedicado a elucidar quais espécies hidrolisadas seriam formadas preferencialmente (FERREIRA e LAGE, 1997).

Algumas espécies hidrolisadas mais significativas do alumínio e do ferro e suas respectivas equações de equilíbrio estão indicadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Equações de equilíbrio de algumas espécies hidrolisadas do alumínio e do ferro

Espécie	Equação de Equilíbrio	Constante de Equilíbrio
$Al^{+3}$	$Al(OH)_{3s} \Leftrightarrow Al^{+3} + 3OH$	$10^{-33}$
$Al(OH)^{+2}$	$Al^{+3} + H_2O \Leftrightarrow Al(OH)^{+2} + H^+$	$10^{-5}$
$Al_2(OH)_2^{+4}$	$2Al^{+3} + 2H_2O \Leftrightarrow Al_2(OH)_2^{+4} + 2H^+$	$10^{-6,3}$
$Al_7(OH)_{17}^{+4}$	$7Al^{+3} + 17H_2O \Leftrightarrow Al_7(OH)_{17}^{+4} + 17H^+$	$10^{-48,8}$
$Al_{13}(OH)_{34}^{+5}$	$13Al^{+3} + 34H_2O \Leftrightarrow Al_{13}(OH)_{34}^{+5} + 34H^+$	$10^{-97,4}$
$Al(OH)_4^-$	$Al(OH)_{3s} + OH^- \Leftrightarrow Al(OH)_4^-$	$10^{-1,3}$
$Fe^{+3}$	$Fe(OH)_{3s} \Leftrightarrow Fe^{+3} + 3OH$	$10^{-38}$
$Fe(OH)^{+2}$	$Fe^{+3} + H_2O \Leftrightarrow Fe(OH)^{+2} + H^+$	$10^{-2,16}$
$Fe(OH)_2^+$	$Fe^{+3} + 2H_2O \Leftrightarrow Fe(OH)_2^+ + 2H^+$	$10^{-6,74}$
$Fe(OH)_4^-$	$Fe^{+3} + 4H_2O \Leftrightarrow Fe(OH)_4^- + 4H^+$	$10^{-23}$
$Fe_2(OH)_2^{+4}$	$2Fe^{+3} + 2H_2O \Leftrightarrow Fe_2(OH)_2^{+4} + 2H^+$	$10^{-1,3}$

Fonte: Ferreira e Lage, 1997

Para cada valor de pH, assumindo-se o equilíbrio entre a fase líquida e a fase sólida do coagulante em meio aquoso, a máxima concentração solúvel do coagulante pode ser estimada de acordo com as seguintes equações:

Equação (1)

$$Al_t = [Al^{+3}] + [Al(OH)^{+2}] + 7[Al_7(OH)_{17}^{+4}] + 13[Al_{13}(OH)_{34}^{+5}] + 2[Al_2(OH)_2^{+4}] + [Al(OH)_4^-] = \frac{10^{-33} [H^+]^3}{Kw^3} + \frac{10^{-38} [H^+]^2}{Kw^3} + \frac{7 \times 10^{-279,8} [H^+]^4}{Kw^{21}} + \frac{13 \times 10^{-526,4} [H^+]^5}{Kw^6} + \frac{10^{1,3} Kw}{[H^+]}$$

Equação (2)

$$Fe_t = [Fe^{+3}] + [Fe(OH)^{+2}] + [Fe(OH)_2^+] + [Fe(OH)_4^-] + 2[Fe_2(OH)_2^{+4}] =$$

$$\frac{10^{-38} [H^+]^3}{Kw^3} + \frac{10^{-40,96} [H^+]^2}{Kw^3} + \frac{10^{-44,74} [H^+]}{Kw^3} + \frac{10^{-61}}{Kw^3 [H^+]} + \frac{2 \times 10^{-78,85} Kw}{Kw^6}$$

Sendo:

$Kw$  = constante de dissociação da água

$Al_t$  = concentração molar total de alumínio solúvel em meio aquoso, em equilíbrio com a fase sólida (hidróxido de alumínio).

$Fe_t$  = concentração molar total de ferro solúvel em meio aquoso, em equilíbrio com a fase sólida (hidróxido de ferro).

A figura 3 apresenta a concentração máxima solúvel do alumínio e do ferro em meio aquoso em função do pH, calculados de acordo com as Equações 1 e 2. Analisando esta figura concluímos que a solubilidade do ferro é muito menor do que a do alumínio; a faixa de trabalho de mínima solubilidade do alumínio situa-se ao redor de 5,5 e 7,5 enquanto que a do ferro está situada aproximadamente entre 5,0 e 11,0.

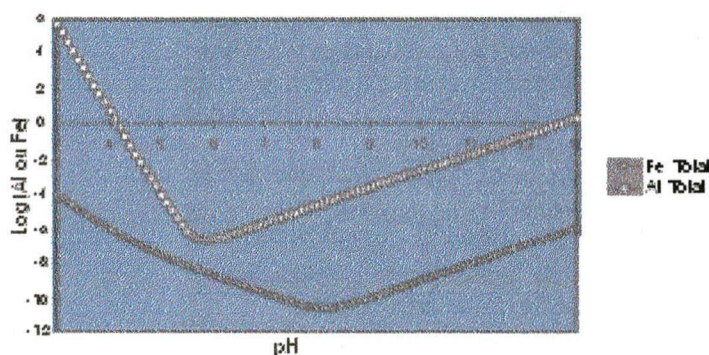


Figura 3 – Diagrama de solubilidade do alumínio e do ferro em função do pH  
Fonte: FERREIRA e LAGE, 1997

Embora os aspectos puramente químicos envolvidos no comportamento do alumínio e do ferro e nas suas interações com o sistema coloidal sejam de fundamental importância na escolha do coagulante a ser empregado no tratamento, os custos associados à sua utilização também devem ser considerados. São de grande importância duas características do efluente bruto: o seu pH inicial e alcalinidade total.

Como a eficiência do processo de coagulação está diretamente relacionada com o binômio pH-dosagem de coagulante, uma vez adicionado uma quantidade de coagulante necessário para que o sistema coloidal seja desestabilizado, o pH de coagulação deve ser ajustado, seja com base ou ácido.

### 3.2.1.3.2 Uso de Polímero como Auxiliar de Coagulação

Polímeros são normalmente usados como auxiliares para melhorar o processo de coagulação e conseqüentemente aumentar a velocidade de sedimentação (TAN et al., 2000).

Tanto polímeros sintéticos como naturais, têm sido usados como auxiliares de floculação e filtração. No primeiro caso busca-se aumentar a velocidade de sedimentação dos flocos, a resistência dos mesmos às forças de cisalhamento que podem ocorrer na veiculação do líquido floculado e a diminuição da dosagem de coagulante primário, enquanto que no segundo, deseja-se reduzir a possibilidade da ocorrência do transpasse e aumentar a taxa de filtração.

Polímeros orgânicos sintéticos têm sido recomendados para o uso de auxiliares de coagulação, quando o alumínio for o coagulante primário. Entretanto, estes polímeros demonstram um grau significativo de seletividade, são caros, e podem não ser biodegradáveis. Também não tem sido avaliado seus efeitos tóxicos (KOETHER et al., 1997).

No tratamento químico, a adição de polímeros aniônicos, catiônicos e não iônicos não aumenta a remoção de DQO do efluente têxtil (BABUNA et al., 1999).

### 3.2.2 Floculação

A floculação consiste na agregação das partículas já desestabilizadas, resultante do choque entre as mesmas, formando partículas maiores e mais densas (microflocos), passíveis de sedimentação. Ocorre sob condições de agitação lenta. Os gradientes, que produzem tensão cisalhante nos flocos existentes, são limitados para que não ultrapassem a capacidade de resistência ao cisalhamento dessas partículas.

A representação matemática da floculação, tem sido baseada considerando o processo em dois passos: transporte e atração.

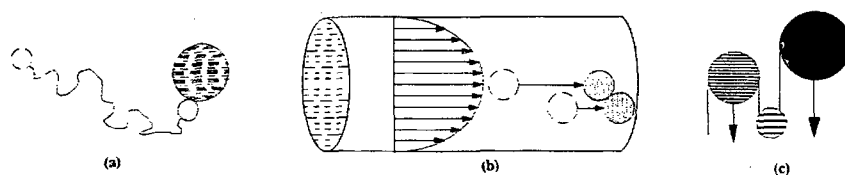
O transporte, levando à colisão das partículas, é realizado devido a variação da velocidade do fluido/partícula resultante de:

- a) movimento Browniano das partículas (floculação pericinética);
- b) gradientes de velocidades devido a agitação (floculação ortocinética);
- c) diferenças na velocidade de sedimentação das partículas individualmente (sedimentação diferencial).

A atração é então parte de um número de pequenas forças variáveis geralmente pertencentes à natureza da superfície da própria partícula.

A figura 4 nos mostra o mecanismo de agregação das partículas.





*Figura 4 – Mecanismo de agregação das partículas: (a) Flocculação Pericinética; (b) Flocculação Ortocinética; (c) Sedimentação Diferencial*

Fonte: ERNEST et al., 1995

Os dois preceitos são sucintamente expressos como uma taxa de sucedidas colisões entre partículas de diferentes tamanhos. O tamanho das partículas envolvidas na colisão, tem um efeito significante nos valores de várias taxas de flocculação (THOMAS et al., 1999).

Uma sedimentação discreta e interações partícula-partícula são mecanismos importantes no transporte de material particulado. Para partículas maiores do que  $1\mu\text{m}$  de diâmetro, o gradiente de velocidade e a sedimentação diferencial são mecanismos de colisão dominante (ERNEST et al., 1995).

Conforme o referido autor, as partículas também podem colidir verticalmente durante o processo de sedimentação. Isto ocorre devido a variação da velocidade de sedimentação presente em um sistema de flocculação. É evidente que a sedimentação vertical das partículas depende do seu tamanho, forma e densidade.

Relações complexas existem entre os numerosos fatores que afetam o fenômeno da flocculação. Estes fatores podem ser: o sistema químico, incluindo o tipo e concentração do coagulante, pH, alcalinidade, tipo e concentração de íons no meio líquido; heterogeneidade de uma suspensão em relação ao tipo, tamanho e fração de volume das partículas; e o tipo de reator incluindo o grau de mistura e variação na escala e intensidade da turbulência (AYOUB, 1996).

Se a formação dos flocos for muito pequeno, compacto e leve, isto resultará em uma redução significativa na velocidade de sedimentação (MCCONNACHIE et al., 1999).

O pH de flocculação do meio líquido é muito importante. Um pH entre 6 e 7, está numa variação efetiva para flocculação com alumínio, mas sais de ferro como cloreto férrico e sulfato férrico fornecem uma variação muito grande de pH para a formação dos flocos. Deve ser notado que a variação do pH ótimo depende dos tipos de sólidos suspensos e da temperatura do meio líquido, especialmente na flocculação com alumínio.

O efeito da temperatura no processo de flocculação e sedimentação também é muito importante. O tempo de formação dos flocos e a velocidade de sedimentação é muito menor em meio líquido frio quando o alumínio é usado como coagulante. Entretanto o uso de

coagulante fêrrico em meio líquido frio geralmente resulta em uma rápida formação de flocos e a turbidez se mantém igual ou menor do que a floculação com alumínio em meio líquido quente.

### 3.2.2.1 Gradiente de Velocidade

O gradiente de velocidade é o parâmetro mais importante na cinética da floculação.

O nível de intensidade de mistura e o tempo de mistura influenciam as características físicas da formação de flocos. A energia de mistura é comumente denominada de Gradiente de Velocidade expressa como  $G$ .

O gradiente de velocidade é originado nos fundamentos da mecânica dos fluidos. Ao iniciar-se o movimento de um fluido dentro de um tubo, as velocidades de escoamento em todos os pontos de um plano normal ao eixo do tubo são praticamente iguais. Junto a parede do tubo forma-se uma camada estacionária, denominada “camada limite de Prandtl”. Com o movimento do fluido, outras camadas de fluido irão se atritar com aquela, gerando esforços tangenciais entre si, deslocando-se com velocidades diferentes, originando, em virtude de tais forças de resistência, “gradientes de velocidades” que se estendem por toda a seção transversal do tubo.

No escoamento laminar o perfil da velocidade é inteiramente desenvolvido no plano normal ao eixo do tubo. Neste tipo de escoamento o fluido se move em lâminas paralelas e em velocidades relativamente baixas.

Em velocidades mais elevadas, o escoamento apresentará comportamento laminar somente nas paredes do tubo enquanto que no restante do tubo, o fluido apresentará flutuações caóticas em todas as direções, tornando-se turbulento.

Os escoamentos laminar e turbulento foram descobertos em 1883 por Osborne Reynolds.

Segundo Fair, em 1968, os choques entre partículas podem ocorrer entre íons, moléculas, colóides e partículas em suspensão. A agitação aumenta a probabilidade de colisões entre as partículas facilitando a agregação.

O conceito de gradiente de velocidade teve origem nas primeiras teorias sobre junção de partículas, por Von Smoluchowski em 1916, que introduziu uma expressão relatando a frequência da colisão entre as partículas, e também o gradiente de velocidade em regime de fluxo laminar (AYOUB, 1996).

O trabalho de Camp e Stein (1943), estabeleceu um criterioso modelo baseado no conceito do gradiente de velocidade média no processo de coagulação-floculação. Eles deduziram a seguinte equação:

$$G = \left( \frac{P}{V\mu} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Onde: P = energia de entrada (Nm/s),  $\mu$  = viscosidade absoluta (Nm/s<sup>2</sup>), e V = volume de líquido (m<sup>3</sup>).

Esta equação foi deduzida para condições de fluxo laminar, que expressa a relação entre o gradiente de velocidade G e a energia dissipada por unidade de volume V. Ela é uma ferramenta muito útil no cálculo dos floculadores e dos sistemas de veiculação de líquido floculado.

Eles também demonstraram que a taxa de floculação é diretamente proporcional ao gradiente de velocidade em qualquer ponto. A taxa de floculação é determinada pelo número de contatos entre as partículas de flocos (ou entre partículas suspensas e partículas de flocos) na unidade de tempo, e que pode ser expressa pela equação:

$$J_{1,2} = N = \frac{G}{6N_1N_2(d_1 + d_2)^3} \quad (4)$$

Esta equação mostra a relação entre o gradiente de velocidade, que é a energia de entrada, e o número de contatos por unidade de volume por unidade de tempo N, entre partículas N<sub>1</sub> de tamanho d<sub>1</sub>, e partículas N<sub>2</sub> de tamanho d<sub>2</sub>. Esta equação é usada para estudar a velocidade com que pequenas partículas de flocos se juntam para formar grandes partículas de flocos. Pode ser usada também para analisar a velocidade pela qual partículas suspensas na água bruta são capturadas pelas partículas de flocos (SHOLJI e KAZI, 1997).

As partículas do tipo 1 podem ser responsáveis pela cor ou pela turbidez; as partículas do tipo 2 podem ser partículas de flocos.

O produto do gradiente de velocidade pelo tempo de detenção constitui-se num parâmetro auxiliar de dimensionamento de uma unidade de dispersão de coagulantes e de floculação, denominado "Número de Camp", expresso como Ca = G x t.

Este produto é adimensional e está ligado à probabilidade de colisão das partículas. Se  $C$  for constante, a probabilidade de colisão também o será, e neste caso, a eficiência será a mesma. Na prática, essa afirmação não é sempre verdadeira, tornando-se necessária a determinação dos valores de  $G$  e  $t$ . O valor de  $G$  está associado ao consumo de energia, e  $t$  à dimensão do floculador ou câmara de floculação, sendo portanto parâmetros econômicos importantes.

Deve ser enfatizado que o produto  $G \times t$  é tão importante como  $C \times t$  na desinfecção (onde  $C$  é a concentração do desinfetante e  $t$  o tempo de contato). Infelizmente, alguns especialistas acreditam que  $G$ , e não  $G \times t$ , é fator de controle dominante para a floculação (KAWAMURA, 1996).

O modelo de floculação de Argaman-Kaufman, é muito importante pois desenvolveu mecanismos da floculação ortocinética. Eles consideraram o papel da turbulência na agregação das partículas e introduziram os efeitos na separação dos flocos. Mais tarde, Camp e Stein (1943) introduziram o gradiente de velocidade RMS no lugar do gradiente de velocidade laminar, estendendo com isso o modelo para o regime de fluxo turbulento. A suposição foi feita para que todas as colisões de partículas fossem permanentes, e a quebra de flocos não fosse considerada. Em 1966, Harris e Kaufman modificaram o modelo previsto para incluir o conceito da quebra dos flocos e das colisões não duradouras. Estes conceitos foram incorporados no modelo da difusão turbulenta, com a suposição de distribuição de tamanho bimodal dos flocos, por Argaman e Kaufman em 1968 ((HAARHOFF e JOUBERT, 1997).

Ainda conforme os autores, foi observado que o diâmetro do floco pode crescer até um certo valor máximo. Quanto maior o gradiente de velocidade  $G$ , menor o diâmetro do floco e maior será sua densidade.

### 3.2.2.2 Floculação em Meio Granular

No Brasil, Richter, estimulado por trabalhos realizados na Índia por Badrinath, desenvolveu um modelo para a floculação em meio granular empregando pedregulhos, visando aplicá-los em estações de tratamento de água para pequenas comunidades. Em 1980 e 1981, Richter e Moreira estudaram a redução da turbidez em floculador granular com leito de pedregulho. Foi considerado que um reator granular longo assemelha-se a vários reatores de mistura completa em série. Obtiveram bons resultados, porém encontraram problemas de colmatagem do meio e dificuldades para limpá-lo (RICHTER, 1991).

SENS e MARTIN em 1991, na França, pesquisaram a floculação em meio granular com grãos esféricos e fixos, a fim de levantar parâmetros sobre floculação granular para aplicação em unidades compactas de tratamento de água. O meio granular era composto por esferas de vidro, variando o diâmetro (3, 5 e 10 mm), o tempo de detenção e as velocidades de escoamento do líquido no meio. Obtiveram melhor remoção de turbidez com esferas de 10 mm de diâmetro, chegando a 93% de eficiência. Para lavagem do leito, foi sugerida a injeção de ar de tempos em tempos, sem interrupção do processo.

A equação (5), proposta por Sens e Martin, calcula o gradiente de velocidade  $G$  diretamente sem o cálculo da perda de carga. Basta conhecer o meio granular e algumas medidas físicas como: o diâmetro dos grãos, a porosidade, e a velocidade de operação.

$$G = \left[ 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^4} \left( \frac{S}{6} \right)^2 v_0^2 + 1,75 \frac{1}{v} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^4} \left( \frac{S}{6} \right) v_0^3 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Pode-se fazer o mesmo para o número de Camp ( $Ca$ ):

$$Ca = \left[ 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2} \left( \frac{S}{6} \right)^2 + 1,75 \frac{1}{v} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^2} \left( \frac{S}{6} \right) v_0 \right]^{\frac{1}{2}} L \quad (6)$$

Onde:

$G$  = gradiente de velocidade ( $s^{-1}$ )

$\varepsilon$  = porosidade do meio granular

$S$  = área específica média dos grãos ( $m^2$ ). Para grãos esféricos,  $S = 6/d$

$d$  = diâmetro do grão ou da esfera (m)

$\nu$  = viscosidade cinemática ( $m^2/s$ ), ( $1/\nu = \rho/\mu$ )

$v_0$  = velocidade de aproximação (m/s)

$L$  = comprimento do meio granular (m)

A perda de carga unitária em um meio granular limpo em estado fixo é dada pela equação a seguir, conhecida como expressão de Ergun:

$$J = \left[ 150 \frac{\mu (1-\varepsilon)^2}{\gamma \varepsilon^3} \left( \frac{S}{6} \right)^2 v_0 + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \left( \frac{S}{6} \right) \frac{v_0^2}{g} \right] \quad (7)$$

$g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$\rho$  = massa específica ( $g/m^3$ )

$\gamma$  = peso específico da água ( $kgf/m^3$ ), e  $\gamma = \rho \cdot g$

O tempo de detenção no floculador granular é dado pela seguinte equação:

$$T = \frac{L}{v} \quad e \quad v = \frac{V_0}{\varepsilon}$$

$$T = L \cdot \frac{\varepsilon}{V_0} \quad (8)$$

Em um floculador granular, dependendo da granulometria e da velocidade de escoamento, a porosidade pode mudar durante o tratamento. Quanto menor o diâmetro, para uma velocidade de escoamento (aproximação), mais rapidamente diminui a porosidade em função do volume de líquido tratado.

A porosidade do meio granular esférico homogêneo é sempre o mesmo, mas os tamanhos das cavidades formadas entre os grãos é sempre maior para os grãos com diâmetro maior. Assim, se as cavidades são maiores, os depósitos de flocos no leito serão menos significativos. Para construir um floculador procura-se diminuir o volume ocupado pelos grãos, isto é, aumentar a porosidade sem diminuir o número de cavidades. Quanto maior a porosidade, menor o volume total do floculador. Para o mesmo volume de reator, quanto maior for o número de cavidades, mais se aproxima da teoria de um grande número de reatores em série.

### 3.2.2.3 Floculação em Meio Granular Expandido

A procura de uma tecnologia com pouca mecanização e a dificuldade de flocular uma água com pequena vazão, conduziu aos estudos da floculação de fluxo hidráulico, em meio granular. Porém, quanto menor o diâmetro dos grãos, maior será o índice de filtrabilidade do meio. Assim, SENS e HANSEN (1995) e CUBAS (1999), passaram a estudar a floculação em

meio granular expandido para evitar a filtração e aumentar a eficiência do processo. Nesta floculação, a expansão do material granular é muito pequena, isto é, as distâncias entre um grão e outro são muito pequenas, permitindo que um grão roce no outro. Apesar da densidade dos grãos ser pequena (pouco superior ao da água), assim como a velocidade, os grãos permanecem próximos.

### 3.2.2.3.1 Fenômeno da Fluidização ou Expansão

A fluidização ou expansão é um fenômeno de deslocamento de partículas sólidas pela corrente líquida. As partículas movem-se desordenadamente no interior da massa líquida. O crescimento da vazão implica numa expansão da camada de grãos, fazendo com que haja um crescimento da energia potencial.

### 3.2.2.3.2 Perda de Carga

Em 1948, Wilhem e Kwauk equacionaram a perda de carga como sendo:

$$\Delta h_e \cdot A = \frac{M}{\rho_s (\rho_s - \rho) g} \quad (9)$$

$\Delta h_e$  = perda de carga no meio expandido (m)

A = área transversal do reator (m<sup>2</sup>)

M = massa específica do leito (g/m<sup>3</sup>)

$\rho_s$  = massa específica do sólido (g/m<sup>3</sup>)

$\rho$  = massa específica do líquido (g/m<sup>3</sup>)

g = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

Na condição de equilíbrio, quando o leito encontra-se completamente expandido, a perda de carga passa a ser constante, podendo ser expressa por:

$$\Delta h_e = \frac{L_0 (\rho_s - \rho) (1 - \varepsilon_0)}{\rho} \quad (10)$$

$L_0$  = altura do leito fixo (m)

$\varepsilon_0$  = porosidade no leito fixo

Segundo DI BERNARDO (1993) em estudos de lavagens de filtros, para grãos com tamanho maior que 1 mm e velocidades ascensionais superiores a 0,20 m/min, o regime de escoamento pode resultar em transição ou turbulento. A equação de Ergun pode ser utilizada para qualquer regime de escoamento, desde que o número de Reynolds, dado pela equação  $\left[ Re = \left( \frac{1}{\mu} \right) \cdot \rho \cdot v \cdot d \right]$ , esteja compreendido entre 1 e 2000.

No leito expandido as velocidades adotadas são relativamente pequenas, porém o diâmetro do grão é grande em relação aos diâmetros normalmente adotados para filtros de areia.

A figura 5 ilustra como se comporta o crescimento da perda de carga em um leito expandido. Para materiais com baixa densidade, quando ocorre a expansão do material, o crescimento da perda de carga diminui e posteriormente decresce, para em seguida permanecer constante. Quanto menor a densidade do grão, mais acentuada e mais longa será a curvatura (SENS, 1997).

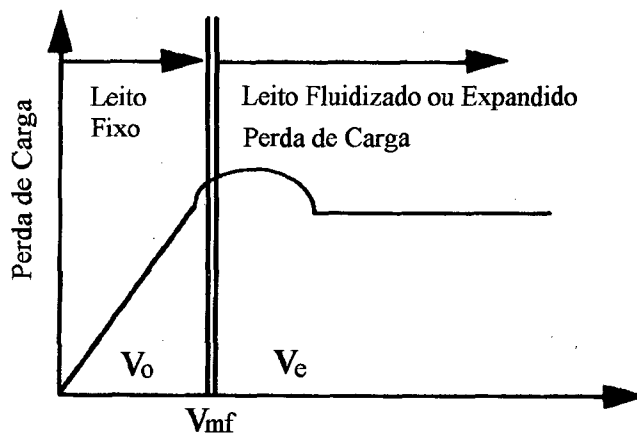


Figura 5 - Comportamento da perda de carga em função da velocidade de aproximação  
Fonte: SENS, 1996

### 3.2.2.3.3 Velocidade Mínima de Fluidização

A passagem do estado fixo ao estado fluidizado corresponde a uma velocidade mínima de fluidização  $v_0$ , assim como para a porosidade  $\epsilon_0$ .

A maioria das equações que permitem o cálculo da velocidade mínima de fluidização utilizam correlações relativas ao estado fixo ou ao estado fluidizado, principalmente entre a porosidade e a velocidade de escoamento do líquido.



A velocidade mínima de fluidização (*vmf*) é mostrada na seguinte equação:

$$v_0 = vmf = \frac{g(\rho_s - \rho)d^2 \varepsilon_0^3}{180\mu(1 - \varepsilon_0)} \quad (11)$$

A equação proposta necessita do conhecimento da porosidade antes da expansão. Para leite homogêneo com esferas idênticas como meio granular,  $\varepsilon_0 = 0,38$ .

Wen e Yon (citado em DI BERNARDO, 1993), propuseram uma relação que permite o cálculo da velocidade mínima de fluidificação sem o conhecimento da porosidade  $\varepsilon_0$ :

$$Vmf = \frac{v}{ds} (\sqrt{1135 + 0,0408Ga} - 33,7) \quad (12)$$

ds = densidade do grão

Ga = número de Galileu =  $d^3 \rho g / \mu^2$

v = viscosidade cinemática ( $m^2/s$ )

#### 3.2.2.3.4 Velocidade Máxima de Fluidização

Segundo JABBOURI (1988), citado por SENS (1997), a velocidade máxima de fluidização é a velocidade limite de queda livre dos grãos. A importância do conhecimento desta velocidade está em saber qual o valor de velocidade de aproximação ascensional que arrasta os grãos. A resultante das forças que exercem sobre um grão ou partícula permite aplicar, expressando a força de arraste em função da energia cinética específica do líquido, o critério de Newton:

$$Ne = \frac{4}{3} \frac{d(\rho_s - \rho)g}{\rho v^2} \quad (13)$$

A análise adimensional mostra a relação entre os diferentes parâmetros, que caracterizam o sistema, deve ser colocada sob a forma de uma relação geral entre dois critérios adimensionais, Ne e Re:

$$Ne = \frac{\alpha}{Re^n} \quad e \quad Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

$$v^{2-n} = \frac{4 d^{1+n} \cdot (\rho_s - \rho) \rho^{n-1} \cdot g}{3 \mu^n \cdot a} \quad (14)$$

Para facilitar o uso desta equação, introduzem-se dois outros números adimensionais:  $x(d) = \text{Ne} \cdot \text{Re}^2$ , e  $y(v) = \text{Re}/\text{Ne}$ .

Os valores de  $a$  e  $n$  são obtidos em função dos valores de  $x(d)$ ,  $y(v)$  e  $\text{Re}$  de acordo com a tabela 3:

Tabela 3 - Valores de  $a$  e  $n$

Re	y (v)	x (d)	a	n
< 1	< 1/24	< 24	24	1
> 1000	> 2270	44 x 10 <sup>4</sup>	0,44	0
	entre estes dois valores		18,5	0,6

### 3.2.2.3.5 Gradiente de Velocidade no Leito Expandido

Para o cálculo do gradiente de velocidade  $G$  no leito expandido, SENS e MARTIN (1991), basearam-se na equação de Ergun como foi proposto nos estudos em leito fixo para a perda de carga, alterando apenas a porosidade do leito fixo ( $\varepsilon_0$ ) pela porosidade do leito expandido ( $\varepsilon_e$ ):

$$G_e = \left[ 150 \frac{(1-\varepsilon_e)^2}{\varepsilon_e^4} \left( \frac{S}{6} \right)^2 v_0^2 + 1,75 \frac{1(1-\varepsilon_e)}{\nu \varepsilon_e^4} \left( \frac{S}{6} \right) v_0^3 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

### 3.2.2.3.6 Número de Camp

O número de Camp  $Ca$ , como visto anteriormente, é um parâmetro auxiliar para o dimensionamento do sistema de floculação.

Da mesma forma como para  $G$ , o número de Camp também pode ser calculado para o leito expandido pela seguinte equação:

$$Ca_e = \left[ 150 \frac{(1-\varepsilon_e)^2}{\varepsilon_e^2} \left( \frac{S}{6} \right)^2 + 1,75 \frac{1(1-\varepsilon_e)}{\nu \varepsilon_e^2} \left( \frac{S}{6} \right) v_0 \right]^{\frac{1}{2}} L_e \quad (16)$$

O tempo de detenção no leito expandido é:

$$T_e = \frac{L_e \cdot \varepsilon_0}{v_0} \quad (17)$$

O número de Camp  $Ca_e$ , conhecendo-se o valor da perda de carga é:

$$Ca_e = Ge \cdot Te = \sqrt{\frac{g \cdot J_e \varepsilon_e}{\nu \cdot \nu_0}} \cdot L_e \quad (18)$$

### 3.2.2.3.7 Porosidade e Altura do Leito

No segundo trecho da figura 5, onde os grãos encontram-se fluidificados, pode-se calcular a porosidade do meio pela equação:

$$\varepsilon_e = \frac{Ex - 1 + \varepsilon_0}{Ex} \quad (19)$$

A altura do leito expandido é dada pela equação:

$$Le = \left( 1 + \frac{\varepsilon_e - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_e} \right) L_0 \quad (20)$$

$\varepsilon_e$  = porosidade no meio expandido

$\varepsilon_0$  = porosidade no meio antes da expansão

$Ex$  = expansão (se a expansão é de 20%,  $Ex = 1,20$ )

$Le$  = altura do leito expandido (m) ( $Le = Ex \cdot L_0$ )

$L_0$  = altura do leito antes da expansão (m)

## 3.3 OZÔNIO

### 3.3.1 Considerações Gerais

O ozônio foi descoberto em 1839 por Schonbein, estudando a decomposição eletrolítica da água. Somente após duas décadas, é que a configuração triatômica contendo apenas oxigênio ficou claramente identificada.

Werner Von Siemens em 1857, identificou a possibilidade de gerar ozônio a partir de descargas elétricas em meio gasoso. Foi a partir desta descoberta que surgiram as bases para gerar ozônio em grande escala.

Em 1886, o ozônio foi reconhecido como um potente desinfetante (LANGLAIS et al., 1991).

O químico francês Marius Paul Otto em 1889, inicia os estudos sobre o ozônio na Universidade de Sorbone, Paris. Com isso, a ação germicida do ozônio ficou evidenciada na

França, onde começou a ser utilizado como desinfetante em Estações de Tratamento de Água. Logo, toda a Europa estava adotando o uso do ozônio.

Nos Estados Unidos, desde 1975 a ozonização tem sido usada para desinfecção de águas residuárias. Sendo o ozônio um poderoso agente oxidante, ele é muito efetivo na destruição de bactérias, vírus, protozoários e outros parasitas (LAZAROVA et al., 1999).

Conforme DI MATTEO, 1992 (citado em DALSSASSO, 1999), as técnicas de ozonização foram desenvolvidas mais significativamente nos últimos 30 anos, particularmente na França, Alemanha e Suíça. No Japão e nos Estados Unidos, o uso do ozônio tem crescido muito nos últimos anos. Los Angeles possui uma das maiores instalações de geração de ozônio do mundo, com objetivo de auxiliar o processo de coagulação e no controle dos precursores de THM's (trihalometanos).

No Brasil a utilização do ozônio começou em 1983, devido a necessidade de alternativas para os métodos convencionais de pré-cloração e pré-aeração no tratamento de águas superficiais. A partir de 1985, o setor industrial também iniciou o uso do ozônio com a aquisição de equipamentos e procedimentos laboratoriais.

Em Santa Catarina, a utilização do ozônio ainda é pequena, se restringindo às indústrias (notadamente para o tratamento de efluentes têxteis), e hospitais (eliminação de patogênicos de seus efluentes, e nas lavanderias).

### 3.3.2 Propriedades Químicas

O ozônio é um gás incolor, parcialmente solúvel em água, instável e evapora a temperatura de  $-112^{\circ}\text{C}$  à pressão atmosférica. Possui cheiro penetrante e é facilmente detectável em concentrações muito baixas (0,01 a 0,05 mg/l). Pode ser produzido a partir de descargas elétricas em meio gasoso.

O ozônio é o segundo oxidante mais poderoso, excedido em seu potencial de oxidação somente pelo flúor. É poderoso contra germes e vírus. O ozônio ataca o trato respiratório, e sua concentração máxima considerada segura para o homem é da ordem de 0,1 ppm.

A qualidade mais importante da molécula do ozônio, da qual resultam suas propriedades físicas e químicas, é a grande quantidade de energia da sua molécula. Trata-se de uma forma molecular do oxigênio, cuja estrutura foi confirmada em 1872 como sendo um triângulo triatômico alotrópico. A ressonância da estrutura das moléculas de ozônio é mostrada na figura 6.

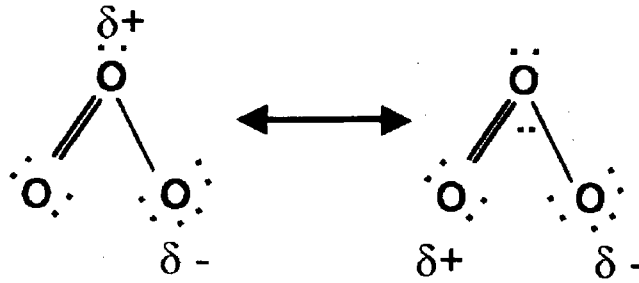


Figura 6 – Possíveis formas da estrutura molecular do ozônio devido a ressonância magnética

Fonte: Langlais et al., 1991

Temperaturas elevadas, radiação ultravioleta, ou a presença de agentes catalisadores podem acelerar o processo de decomposição do ozônio.

A decomposição do ozônio ocorre em processo em cadeia, que pode ser representado através das reações fundamentais, como mostra a figura 7, de acordo com SENS et al., 1990.

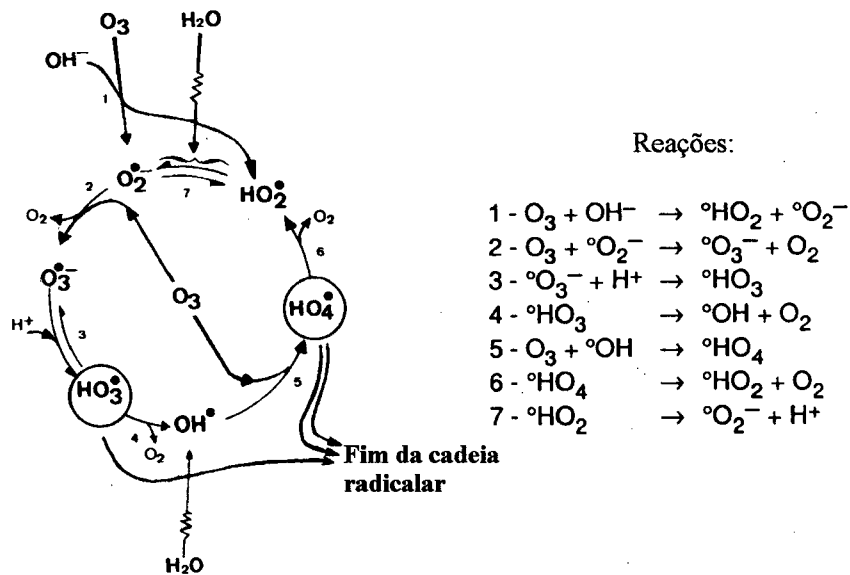


Figura 7 - Esquema geral da decomposição do ozônio, e suas reações

Fonte: SENS et al., 1990

Os mecanismos de ação do ozônio em compostos orgânicos ocorrem através das reações do ozônio com estes compostos e podem ser divididos em dois tipos: reações diretas, as quais envolvem o ozônio molecular e, reações indiretas, que envolvem reações com os radicais hidroxilas ( $OH^{\circ}$ ) (MELO FILHO, 1997).

A figura 8, ilustra os caminhos das reações do ozônio com compostos orgânicos.

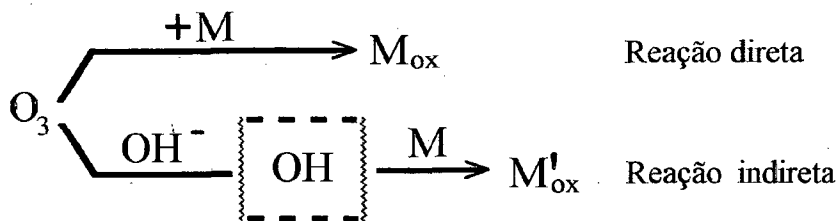


Figura 8 – Reatividade do ozônio em soluções aquosas

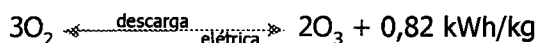
Fonte: LANGLAIS et al., 1991

### 3.3.3 Produção de Ozônio

O ozônio é um gás instável, produzido através de descarga elétrica. Como ele não pode ser armazenado nem transportado, deve ser gerado no próprio local de consumo.

Segundo NEBEL (1991), citado por MELO FILHO (1997), o ozônio pode ser gerado de diversas maneiras, sendo que a maioria delas requer que as ligações estáveis da molécula de oxigênio sejam divididas em dois átomos de oxigênio. Estes átomos reagem quase que imediatamente com a molécula do oxigênio para formar o ozônio.

WERNER VON SIEMENS (1957), citado na referência anterior, mostrou que o ozônio é produzido a partir do oxigênio através da seguinte reação:



De acordo com SCHULHOF et al. (1988), citados na mesma fonte, um gerador típico deste processo, requer cerca de 16,5 kWh para produzir 1,0 kg de ozônio a partir do ar.

Desde quando foi construído o primeiro ozonizador por Marius Otto, os equipamentos existentes atualmente funcionam segundo o mesmo princípio básico, isto é, o ar ou o oxigênio seco escoam em uma célula onde se tem a descarga elétrica, produzida por uma fonte elétrica de alta voltagem, conforme esquema da figura 9.

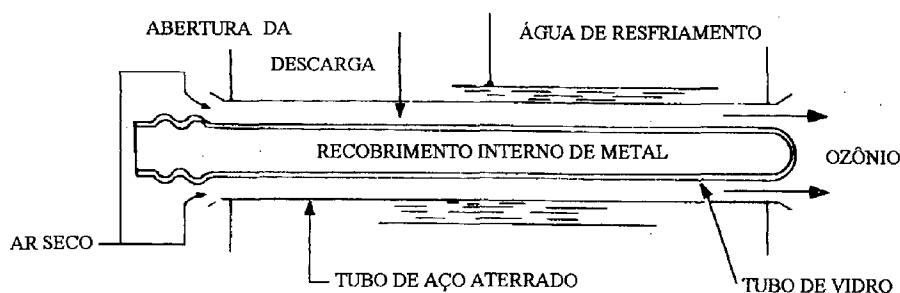


Figura 9 – Esquema da célula geradora de ozônio

Fonte: Di Bernardo, 1993

Ainda segundo NEBEL, citado anteriormente, quanto mais alta a concentração de ozônio, maior é a sua taxa de destruição pelo átomo de oxigênio, formado no aparelho gerador de ozônio, porém a velocidade de destruição é muito lenta. Portanto a concentração do ozônio deve ser limitada, de modo que a taxa de formação não se iguale à taxa de destruição. Na prática, esta concentração é da ordem de 4 a 8% da concentração do alimentador de ozônio em forma de ar ou oxigênio, respectivamente.

### 3.3.4 Transferência de Ozônio

A transferência do ozônio para a água segundo GOULD e ULIRSH (citados em DALSSASSO, 1999), é usualmente baseada em processos heterogêneos, que envolvem transferência de massa do ozônio por meio de bolhas, através da interface gás/líquido para a água.

Quando o ozônio está dissolvido no meio líquido, obedece a Lei de Henry, segundo a qual, a concentração de saturação é proporcional a pressão parcial do ozônio a uma dada temperatura. (LANGLAIS et al., 1991). Dentre os fatores que influenciam a constante de Henry, os considerados mais importantes são: temperatura, pH, e força iônica.

A transferência do ozônio para a água inicia com a dispersão do gás na fase líquida, em forma de pequenas bolhas. Posteriormente o ozônio é incorporado à massa líquida através da interface gás-líquido. A resistência na transferência de massa durante a fase gasosa pode ser considerada praticamente desprezível. A única resistência que pode ser encontrada durante a absorção do gás no líquido, é na membrana líquida, perto da interface gás-líquido.

#### 3.3.4.1 Câmara de Contato

Existe uma grande variedade de câmaras utilizadas para introduzir o ozônio no meio líquido, tais como câmara difusora de ar contra-corrente, câmara de mistura com difusores, misturadores estáticos em linha, e outros. As câmaras devem ser projetadas para realizarem uma alta eficiência de transferência de ozônio.

LAPLANCHE et al. (1989) e MASSCHELEIN (1988), citados em DALSSASSO (1999), evidenciam que as câmaras com difusores que dispersam o gás em forma de bolhas são os sistemas de contato mais amplamente usados para ozonização. A mistura do gás no meio líquido é realizada por difusores porosos ou tubos sinterizados, acoplados no fundo da câmara. A transferência do ozônio depende da turbulência entre as fases gasosa e líquida, do

número e tamanho das bolhas e da área de transferência interfacial entre as duas fases dos fluidos.

Os difusores devem produzir bolhas com diâmetro da ordem de 3 a 5 mm, o que é conseguido com difusores porosos com vazios intergranulares de tamanho compreendido entre 50 a 100  $\mu\text{m}$ . As bolhas maiores são caracterizadas por áreas menores entre o gás e o líquido, tornando a eficiência menor. O tempo de contato entre as bolhas e o líquido também influi na eficiência do processo de transferência. Quanto mais lenta for a ascensão das bolhas no meio líquido, maior o tempo de contato. A relação entre o diâmetro da bolha e a velocidade de ascensão é mostrada na figura 10.

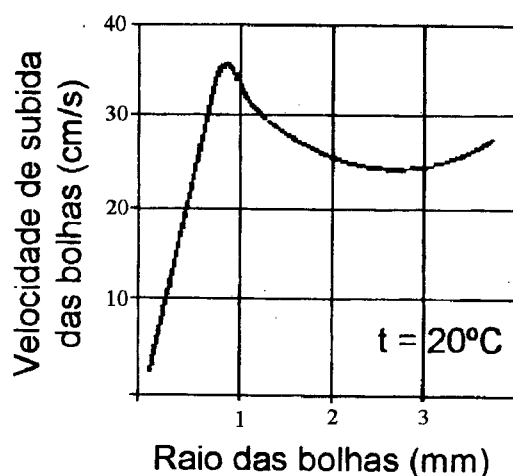


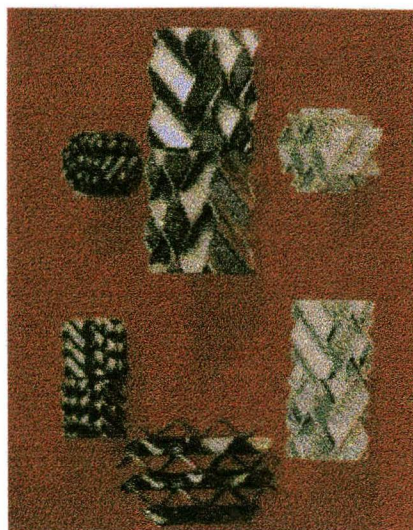
Figura 10 – Velocidade ascensional das bolhas em função de suas dimensões

Fonte: Langlais et al. 1991

#### 3.3.4.2 Misturador Estático

De acordo com LAPLANCHE, 1995 (citado em DALSSASSO, 1999), os misturadores estáticos proporcionam uma ótima transferência do gás para o meio líquido, cerca de 80 a 85%, num tempo de contato muito reduzido (1 a 2 segundos). Estes dispositivos são normalmente confeccionados em aço inoxidável, em módulos, que são dispostos verticalmente em série no interior de uma tubulação. Cada módulo é composto por uma série de chapas onduladas, soldadas perpendicularmente, uma em relação a outra. O líquido flui através dos módulos no sentido descendente, enquanto o gás ozônio, injetado em linha, a montante dos módulos, é arrastado pela água enquanto tenta fluir em sentido contrário. Para se obter bons resultados na transferência deve-se observar a seguinte relação entre vazão do gás e vazão do líquido:  $Q_g/Q_l \leq 0,15$ . A figura 11 mostra os módulos do misturador estático.





*Figura 11 – Misturador Estático – módulos*  
 Fonte: DALSSASSO, 1999

### 3.3.5 Pré-Ozonização

Na água, a pré-ozonização leva a eliminação de compostos minerais, cor, turbidez, sólidos suspensos, gosto e cheiro; degrada em parte a matéria orgânica natural e microorganismos inativos; melhora a coagulação-floculação-decantação.

No efluente têxtil, a pré-ozonização melhora a biodegradabilidade e reduz seu conteúdo orgânico e inorgânico. O ozônio também pode ser aplicado como uma Tecnologia de Oxidação Avançada (TOA), desde que ele possa reagir via radical hidroxil, que aparece devido a sua decomposição (BELTRÁN et al., 1997).

Conforme estudos de MELO FILHO (1997), a pré-ozonização de efluentes têxteis reduz a geração de lodo em até 40%, como consequência da diminuição da taxa de coagulante, e é praticamente ineficaz na redução da DQO quando utilizada baixas taxas de tratamento.

O ozônio tem sido usado para aumentar a biodegradabilidade do carbono orgânico dissolvido (COD) através da quebra de compostos complexos em moléculas simples. A capacidade do ozônio em aumentar a biodegradabilidade da matéria orgânica é sabida, como é sua capacidade em promover o crescimento bacteriano (RIBAS et al., 1997).

O uso do ozônio aumenta os níveis de carbono orgânico dissolvido biodegradável (CODB), que é definido como uma fração do carbono orgânico dissolvido que pode ser usado pelas bactérias para crescimento e manutenção celular (SIDDQUI et al., 1997).

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 susceptíveis, tais como intermoleculares, existentes entre partículas, ou indiretamente nas ligações entre metais e particulados, resultando na divisão de polímeros em fragmentos de

pequenos tamanhos, e o aumento da carga coloidal do sistema, favorecendo a ocorrência de mais ligações metálicas. A pré-ozonização frequentemente produz um aumento na remoção de partículas através da coagulação e filtração.

Espécies inorgânicas são muitas vezes eliminadas usando a pré-ozonização, mas precisa ser seguida de filtração ou coagulação-floculação. Íons metálicos podem ser removidos quando formam espécies insolúveis na oxidação. Na presença do bromo, a amônia pode ser decomposta em gás nitrogênio pela ozonização. Neste processo,  $\text{Br}^-$  é rapidamente oxidado para HOBr pelo ozônio, reagindo com a amônia, levando a formação de  $\text{N}_2$  e  $\text{Br}^-$ . O comportamento do bromo na água, na pré-ozonização é preocupante pois leva a formação de ácido hipobromoso ou hipobromico e bromato, um carcinogênico em potencial.

O uso do ozônio antes da filtração por carvão ativado granular (GAC) é recomendado para aumentar o desempenho do mesmo. Porém o processo de ozonização tem mostrado diminuir a capacidade do filtro GAC em remover orgânicos halogenados.

O ozônio é muito usado como agente oxidante na indústria química. Muito recentemente, o tratamento de efluentes industriais com ozônio foi considerado atrativo, devido ao aparecimento de efetivos métodos de geração de ozônio e novos desenvolvimentos de tecnologias de tratamento com ozônio. Os corantes contém uma ampla variedade de compostos orgânicos. Esta mistura complexa geralmente é caracterizada por parâmetros como COT e COD. No efluente têxtil, a aplicação de aumento na dose de ozônio, não leva a uma redução maior de níveis desses parâmetros, devido a espécies captoras e as reações lentas (RAKOCZI, 1990).

O processo de ozonização contínua combinado com os processos de coagulação química e biológico aeróbico, é capaz de reduzir a DQO do efluente têxtil em 80% ou mais. No processo combinado, a coagulação química é capaz de efetivamente remover a maioria dos sólidos suspensos e dissolvidos, enquanto que a ozonização é responsável principalmente pela decomposição das moléculas fortemente estruturadas dos corantes, em pequenas moléculas orgânicas e tornando assim, mais fácil a biodegradação no processo biológico (LIN e LIU, 1994a).

Ainda segundo os mesmos autores, a ozonização representa o melhor método que tem sido experimentado para tratar os efluentes têxteis.



### 3.3.5.1 Efeitos sobre a Coagulação-Floculação

A adição de um oxidante forte como o ozônio, no efluente têxtil bruto, altera a natureza ou a quantidade de cargas na superfície das partículas, facilitando a coagulação/floculação. De acordo com o pH pode ocorrer a formação de precipitados metálicos, que são removidos por sedimentação ou filtração. O aumento de grupos carboxílicos e fenólicos, decorrentes da ozonização, auxiliam a adsorção de compostos orgânicos em hidróxidos metálicos e nos flocos, melhorando a coagulação/floculação.

BECKER et al. (1995), citado por CAMEL e BERMOND (1998), mostraram alguns resultados onde a pré-ozonização foi prejudicial à coagulação, no tratamento de água. Eles notaram uma redução significativa na distribuição do peso molecular, e devido a isso, um aumento na dose de coagulante foi necessária para permitir uma boa redução de turbidez e COT.

A ozonização induz a um restrito decréscimo de COT, porque a estrutura dos compostos é somente modificada e não completamente oxidada a dióxido de carbono; mas ela diminui bastante depois da coagulação-floculação.

Após a ozonização os níveis de redução de DQO não são ótimos, pois deve-se notar que não acontece uma oxidação completa mas sim uma oxidação parcial durante o processo da ozonização (BABUNA et al., 1999).

### 3.3.5.2 Remoção da Cor

A remoção da cor de águas altamente coloridas varia em função da dosagem de ozônio e da quantidade de material colorido (corantes).

O ozônio é muito efetivo na descoloração de efluentes têxteis porque ele ataca as duplas ligações dos corantes, que estão associadas à cor. O pH e a condutividade praticamente permanecem constantes, enquanto a cor diminui gradualmente durante a ozonização.

A remoção da cor pela ozonização é bastante efetiva e razoavelmente rápida. A classe do corante é bastante significativa na determinação do comportamento dos corantes. Para um menor tamanho, a estrutura química, se compacta, pode ter um impacto negativo na taxa de reação. Dosagens razoáveis de ozônio permitem uma boa eficiência na remoção da cor para corantes ácidos, mordentes, catiônicos, diretos, reativos e enxofre. Corantes dispersos e tinas são mais difíceis de se remover, mesmo à altas concentrações de ozônio.

DI MATTEO (1992), citado por DALSSASSO (1999), com base numa série de estudos relata que a pré-ozonização aumenta a remoção tanto da cor verdadeira como da aparente.

IKEHATA (1975) citado por MELO FILHO (1997), realizou estudos em um piloto de descoloração com ozônio, utilizando efluente proveniente de uma usina de tinturaria de seda artificial (rayon) previamente clarificado. Ele constatou o seguinte:

- A reação de descoloração segue uma lei cinética de primeira ordem até a eliminação de 90% de cor.
- A taxa global de reação está sobretudo ligada a transferência de massa gás-líquido, onde se dá o melhor rendimento de transferência otimizando a injeção de ozônio.
- O pré-tratamento do efluente industrial permite dividir por três a quantidade de ozônio necessária a fim de obter uma descoloração de 95%, permitindo por outro lado uma melhor eliminação da DQO e da DBO (25 e 10% respectivamente).

Na maioria das vezes, a ozonização de substâncias húmicas leva a uma rápida descoloração. Isto pode ser atribuído à desmineralização do material húmico; simultaneamente, compostos ácidos e fenólicos são detectados como resultado da desmineralização. A redução de COT e COD é pequena, pois a ozonização de substâncias húmicas leva a formação de pequenas moléculas, principalmente aldeídos e ácidos carboxílicos, que se acumulam na solução devido a sua resistência ao ozônio (KAWAMURA, 1996).

### 3.3.6 Pós-Ozonização

A ozonização final deve eliminar todos os microorganismos remanescentes com subsequente minimização de formação de subprodutos da desinfecção.

O ozônio é reconhecidamente um poderoso agente oxidante e desinfetante, utilizado a muito tempo na desinfecção final em sistemas de tratamento de água. Assim, a utilização do ozônio para a descoloração do efluente têxtil, permitiria obter uma desinfecção deste efluente antes de ser lançado no meio natural.

### 3.3.7 Subprodutos da Ozonização

Alguns trabalhos tem mostrado que o ozônio pode formar subprodutos, tais como: aldeídos, peróxidos de hidrogênio e peróxidos orgânicos, ácidos carboxílicos, epóxidos e brometos. A formação desses subprodutos depende do tipo de substrato reativo com o ozônio,



e que alguns deles podem ser agentes potenciais de alquilação e arilação, ou altamente mutagênicos (LANGLAIS et al., 1991).

### 3.3.8 Toxicidade do Ozônio e dos Efluentes

A aspiração direta do ozônio é extremamente perigosa pela sua alta toxicidade ao ser humano. A ingestão direta, através de água ozonizada, não representa perigo sério ao ser humano, pois a meia vida do ozônio dissolvido na água é relativamente curta. A tolerância do ser humano quando exposto em local com ozônio no ar pode ser observada na figura 12. Quando exposto durante cerca de 2 horas a uma dosagem de ozônio na ordem de 2 mg/l, o ser humano sente secura na boca e garganta, dores no peito, perda de habilidade mental, dificuldade de coordenação e articulação, tosse e perda de 13% da capacidade vital (DI BERNARDO, 1993).

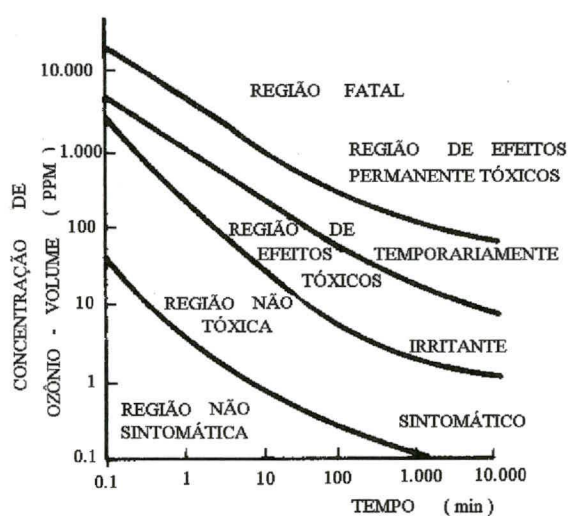


Figura 12 – Tolerância do ser humano ao ozônio  
Fonte: Di Bernardo, 1993

Os corantes, orgânicos halogenados e surfactantes não iônicos, medidos através dos parâmetros de absorvância e NPDOX (Halogenados Orgânicos Dissolvidos Não Purgável), representam uma classe específica de poluentes tóxicos e/ou inibitórios. A ocorrência desses poluentes no efluente é confirmado pelos altos valores de COT e DQO. A ozonização causou uma redução de cerca de 90% de todos os valores dos poluentes potencialmente tóxicos e/ou inibitórios, embora provocou um aumento nas concentrações dos aldeídos. A redução da toxicidade indica que, embora as concentrações de aldeídos tenham aumentado, a maior influência na toxicidade é devido ao decréscimo de outros poluentes potencialmente confirmado pelo aumento da DBO<sub>5</sub> (LOPEZ et al., 1999).

KUNZ et al. (1998), avaliaram a toxicidade de três corantes normalmente utilizados no processamento têxtil (preto reativo-5, azul reativo-19 e azul reativo-21) e seus produtos de degradação frente a ozonização. Os testes de toxicidade foram realizados com a alga *S. subspicatus*. Medidas da concentração da alga foram determinadas no início e no final do teste através de fluorescência. Os corantes não inibiram o crescimento da alga, no entanto, o processo de ozonização causou uma apreciável redução na toxicidade do corante preto reativo-5. O corante azul reativo-19 teve sua toxicidade aumentada com a ozonização e o azul reativo-21 não demonstrou alterações significativas em sua toxicidade com a ozonização.

Maiores investigações são necessárias em relação à ozonização e suas reações com os corantes existentes nos efluentes têxteis.

## CAPÍTULO IV

### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A investigação experimental foi desenvolvida em um piloto de floculação em meio granular expandido onde trabalhou-se com efluente têxtil pré-ozonizado, não ozonizado (bruto) e tratado biologicamente. Pilotos de a ozonização foram também montados para ozonizar o efluente têxtil.

Os pilotos foram montados no LEEA (Laboratório de Experimentação em Engenharia Ambiental) situado no LIMA (Laboratório Integrado de Meio Ambiente) pertencente ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

#### 4.2 PROPOSTA DE TRATAMENTO

Foram propostos três tipos de tratamento neste experimento, como mostra a figura 13:

Primeiro: a pré-ozonização do efluente bruto, seguido do tratamento físico-químico (coagulação-floculação) com um tempo de floculação de apenas 3 minutos, e seguido depois pela decantação onde amostras foram coletadas num tempo de decantação de 4 e 7 minutos.

Segundo: a pós-ozonização do efluente decantado, ou seja, o efluente bruto recebe o tratamento físico-químico (coagulação-floculação-decantação) e no final do tratamento, é ozonizado.

Terceiro: A pré-ozonização do efluente bruto, seguido de um tratamento biológico (leito fluidizado) e pelo tratamento físico-químico (coagulação-floculação-decantação).

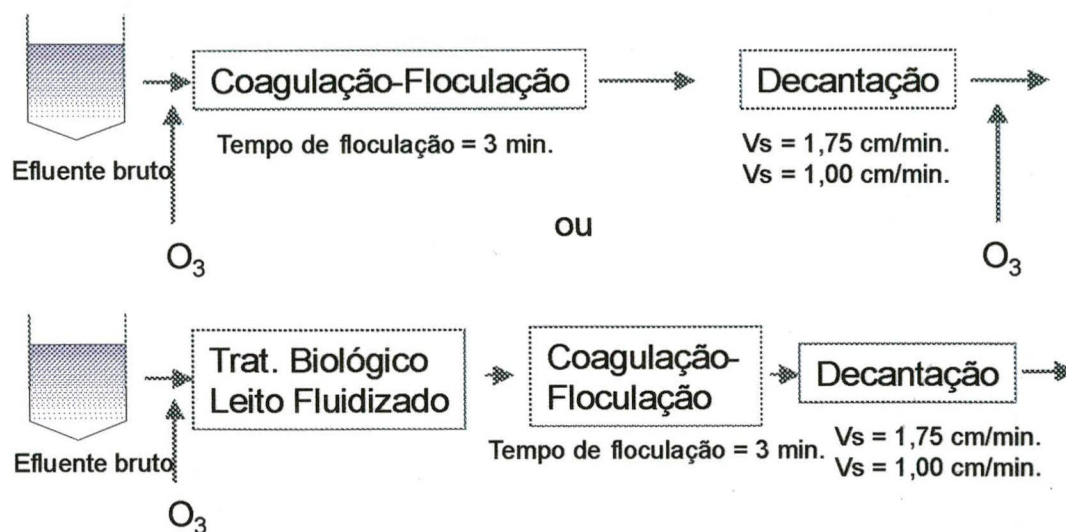


Figura 13 – Esquema de propostas de tratamento

A seguir, a figura 14 apresenta um desenho esquemático do sistema piloto usado neste experimento.



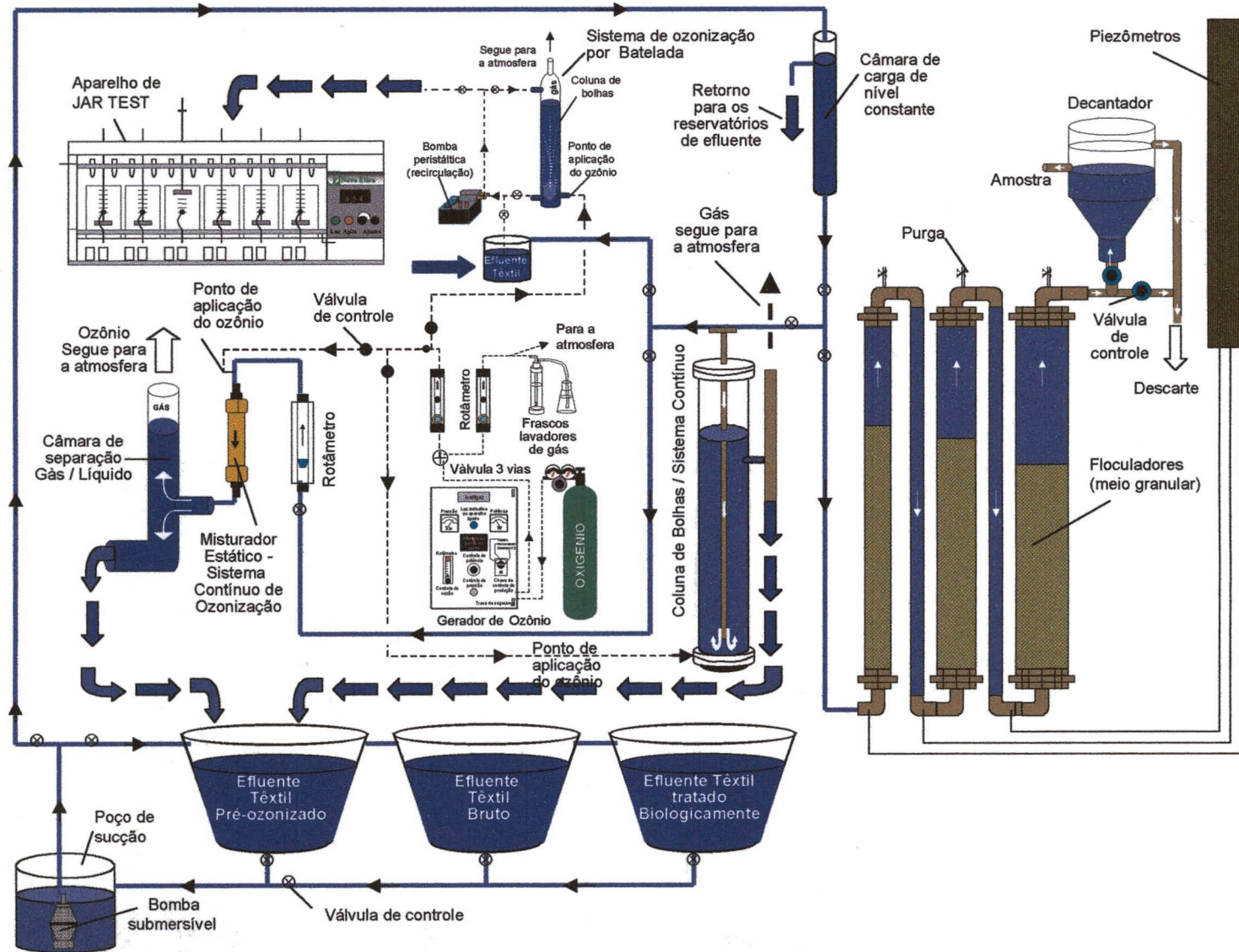


Figura 14 – Desenho esquemático do sistema piloto

O experimento foi dividido em três etapas que podem ser vistas no esquema anterior:

- 1º etapa (estudo em descontínuo): foram realizados os ensaios de coagulação-floculação em aparelho Jar Test para otimizar os parâmetros de tratabilidade do efluente em estudo; e a ozonização do efluente bruto, com o objetivo de encontrar a melhor dosagem de ozônio para aplicar em sistema contínuo.
- 2º etapa (estudo em contínuo): foi realizada a ozonização e o funcionamento do piloto de floculação. Foram utilizados dois sistemas de ozonização em contínuo: com misturador estático e com coluna de contato. Após ozonizado o efluente era encaminhado ao reservatório para alimentação do piloto de floculação (também alimentaram o piloto de floculação o efluente bruto e o efluente tratado biologicamente). A floculação aconteceu em meio granular expandido, com um tempo de floculação ou de detenção de apenas 3 minutos. Do floculador o efluente segue para a decantador (descontínuo), de onde amostras eram coletadas a cada 20 minutos para análise de cor e turbidez, num tempo de decantação de 4 e 7 minutos.
- 3º etapa (estudo em descontínuo): foram realizados ensaios de Jar Test com o efluente bruto, e o efluente decantado (7 min) foi submetido à ozonização.

### 4.3 O EFLUENTE TÊXTIL

Todo o experimento foi realizado com efluente industrial cedido pela Indústria Têxtil Damyller, que fica situada no Município de Nova Veneza (SC). A vazão de efluente desta indústria é de 15 m<sup>3</sup>/h, o qual antes de seguir para o tratamento, é encaminhado a um tanque de equalização para controle de vazão, temperatura e pH (que ficava em torno de 7,5). Deste tanque foi retirado o efluente para ser enviado até o laboratório onde foram realizados os experimentos. O efluente era enviado três vezes por semana e era foi acondicionado em bombonas de 200 l para o transporte entre a indústria e a UFSC (5 bombonas por carga), e posteriormente foram armazenados em caixas de água de PVC (1000 l) e de fibra de vidro (2000 l), providas de tampa, em condições de manter o seu interior o mais escuro possível. Nestas caixas eram feitas as correções do pH (foi trabalhado na faixa de 7,5 a 7,8), quando necessário. As unidades de reservação podem ser visualizadas na figura 15.





*Figura 15 – Unidades de reservação dos efluentes bruto e ozonizado*

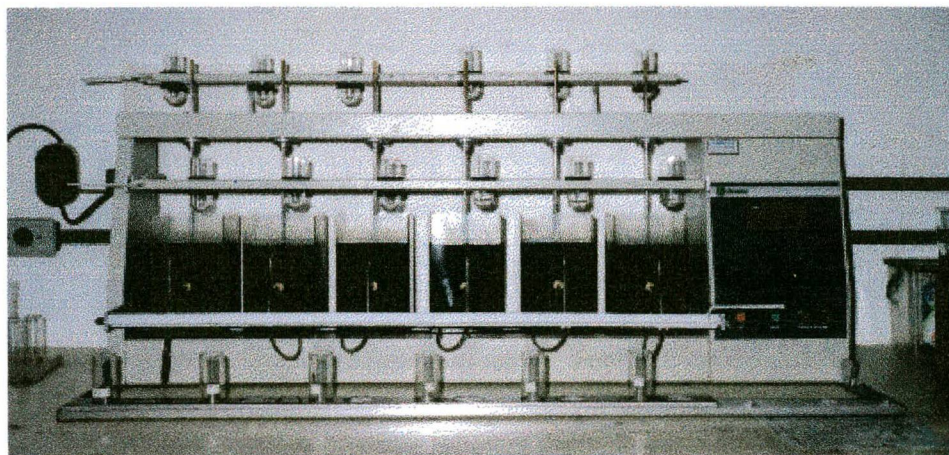
O efluente têxtil analisado, é proveniente das seguintes etapas de processamento (etapas essas referentes ao processamento têxtil do período em estudo): desengomagem, estonagem com enzima ácida e neutra, redução (descoloração da peça), alveamento, amaciamento, tingimento, resinagem (formação de película protetora dos fios), acidificação e alcalinização. Os principais corantes utilizados foram os corantes reativos Laranja BF 2R, Amarelo BF 3R, Azul BF GN, e o Preto Direto NF 700%.

#### *4.4 Etapa 1: COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO / PRÉ-OZONIZAÇÃO (DESCONTÍNUO)*

##### **4.4.1 Ensaio de Coagulação-Floculação**

Para a realização dos ensaios de coagulação-floculação, testes de jarros foram realizados para determinar a melhor dosagem de coagulante, melhor dosagem de polímero, melhor tempo de floculação, melhor pH e melhor gradiente de velocidade, obtendo assim a otimização dos parâmetros de tratabilidade para o efluente têxtil em estudo.

Os ensaios foram realizados em Equipamento de Reatores Estáticos (Jar-Test), modelo Nova Ética, composto de 6 reatores (jarros) tronco-prismáticos de seção transversal quadrada, de capacidade de 2 litros cada reator, permitindo obter gradientes de até  $2200 \text{ s}^{-1}$ , apresentado na figura 16. A agitação é feita através de agitadores mecânicos.



*Figura 16 – Aparelho de Jar-Test, com amostras de efluente têxtil*

O coagulante utilizado nos ensaios foi o Sulfato de Alumínio PA [ $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 \text{ a } 18 H_2O$ ], por ser o coagulante usado na Estação de Tratamento de Efluentes da Indústria Têxtil Damyler, cuja concentração era de 800 mg/l. As soluções foram preparadas previamente dissolvendo 50,0 gramas de sulfato de alumínio em 1000 ml de água deionizada ( $C = 50 \text{ mg/ml}$  ou 5%).

O alcalinizante utilizado foi a suspensão de cal (hidratada), preparada com produto comercial na seguinte concentração:  $C = 50 \text{ mg/ml}$  ou 5%. O alcalinizante usado pela indústria é o hidróxido de sódio líquido,  $C = 400 \text{ mg/l}$ . A opção pela cal foi por ser mais utilizada nos processos de tratamento e por tê-la no laboratório.

Como auxiliar de floculação utilizamos uma solução de Polímero Sintético não Iônico (PRAESTOL 2500), na seguinte concentração:  $C = 0,1 \text{ mg/ml}$  ou 0,01%.

#### 4.4.2 Protocolo do Ensaio de Coagulação-Floculação

A metodologia utilizada nos ensaios de coagulação-floculação para a otimização das dosagens será descrita a seguir.

Série 1 - Construção dos Diagramas de Coagulação (determinação das dosagens de cal e sulfato de alumínio)

Para determinação do melhor pH (dosagem de cal), como da melhor dosagem de coagulante (sulfato de alumínio), foram realizados 8 ensaios, cada um com dois aparelhos Jar-Test, totalizando 12 jarros por ensaio. Em cada ensaio a variação da concentração de sulfato de alumínio de um jarro para o outro era de 5 mg/l, iniciando com 450 mg/l, chegando no



último jarro com 1000 mg/l (esta variação apresenta as dosagens normalmente utilizadas pelas indústrias). No primeiro ensaio não foi adicionado alcalinizante (cal) em nenhum dos jarros, no segundo ensaio foi adicionado 50 mg/l, no terceiro 100 mg/l, no quarto 200 mg/l, assim sucessivamente, até a concentração de 600 mg/l de cal no último ensaio.

A adição do coagulante (coagulação/mistura rápida), foi realizada com os agitadores a 500 rpm ( $G = 1200 \text{ s}^{-1}$ ), mantida durante 30 segundos. Após este tempo, os agitadores foram levados a 33 rpm ( $G = 20 \text{ s}^{-1}$ ) durante 20 minutos, correspondendo ao período de floculação (mistura lenta), sendo que no final deste tempo os agitadores eram desligados, passando-se à fase de sedimentação, ou decantação, onde os flocos formados sedimentavam. Nos tempos de decantação de 4 e 7 minutos foram coletadas amostras, a 7 cm abaixo do nível do efluente, para as análises de cor e turbidez do efluente decantado.

Foram escolhidos 3 pontos de trabalho, (que chamou-se de A1, A2 e A3), que representaram regiões do diagrama de coagulação que forneceram os melhores resultados de remoção de cor e turbidez.

#### Série 2 - Otimização da Dosagem de Polímero

Para cada um dos pontos escolhidos na série 1, foi realizado dois ensaios de jar test, sendo o polímero aplicado de duas maneiras: após a mistura rápida e, 3 minutos depois de iniciar a mistura lenta com  $G = 200 \text{ s}^{-1}$  (175 rpm) durante 1 minuto, e a concentração de polímero aplicada a cada jarro variou de 0,05 mg/l, sendo que no primeiro jarro a concentração foi de 0,25 mg/l e no último 0,55 mg/l.

Foram coletadas amostras nos tempos de decantação de 2, 4, 5,5 e 7 minutos, para análise de cor e turbidez. O ensaio que apresentou o menor valor de cor e turbidez foi considerado como sendo o ponto de melhor dosagem de polímero, e modo de aplicação.

#### Série 3 - Otimização da Mistura Rápida

Escolhidos os melhores pontos das séries 1 e 2, foram realizados 3 ensaios para cada um, no qual as dosagens de sulfato, cal e polímero, bem como o pH de coagulação já foram definidos para esta série, para escolher o melhor gradiente e melhor tempo de mistura rápida.

As condições de operação foram as seguintes:

\* Mistura rápida: o gradiente de velocidade é variável para cada ensaio, sendo  $G = 600, 900$  e  $1200 \text{ s}^{-1}$  respectivamente, e o tempo de mistura rápida, variável para cada jarro, de 5, 10, 15,

20, 25 e 30 segundos, respectivamente (a cada 5 segundos uma haste era levantada manualmente).

\* Aplicação do polímero: conforme definido na série 2.

\* Flocculação: a mistura lenta é feita com  $G = 20 \text{ s}^{-1}$  (33 rpm), num tempo de 20 min.

\* Sedimentação: foram coletadas amostras no tempo de decantação de 4 e 7 minutos para análise de cor e turbidez.

Os reatores (com polímero e sem polímero) que apresentaram os menores valores de cor e turbidez, foram os escolhidos.

#### Série 4 - Otimização da Flocculação

Foram realizados 6 ensaios para cada um dos pontos (com polímero e sem polímero) escolhidos na série 3. Sendo assim, os parâmetros da mistura rápida (tempo e gradiente) como as dosagens de sulfato, cal, polímero e pH de coagulação, estão definidos para esta série.

As condições de operação foram as seguintes:

\* Mistura rápida: conforme definido na série 3.

\* Aplicação do polímero: conforme definido na série 2.

\* Flocculação: para cada ensaio (com polímero e sem polímero) foi variado o gradiente de velocidade  $G$ . Os gradientes foram de 20, 30, 40, 65, 75 e 85  $\text{s}^{-1}$  respectivamente. Para cada jarro o tempo de flocculação variou: 5, 10, 15, 20, 30 e 45 minutos respectivamente.

\* Sedimentação: foram coletadas amostras nos tempos 4 e 7 minutos para análise de cor e turbidez.

De acordo com os jarros que melhores resultados obtiveram em termos de cor e turbidez, e segundo a metodologia proposta por DI BERNARDO, PÁDUA e LIBÂNIO (1998) para a determinação dos gradientes para cada câmara do floculador, foram escolhidos os melhores gradientes e o tempo total de flocculação.

#### Série 5 - Determinação do Volume de Lodo

Foram realizados 2 ensaios (com e sem polímero), com os parâmetros já otimizados. Após o término da flocculação, os jarros ficaram em repouso por 20 minutos (decantação), o sobrenadante foi descartado e o volume restante dos 6 jarros, foi transferido para os Cones Imhof, onde eram feitas as leituras do volume de lodo sedimentado durante 6 horas.

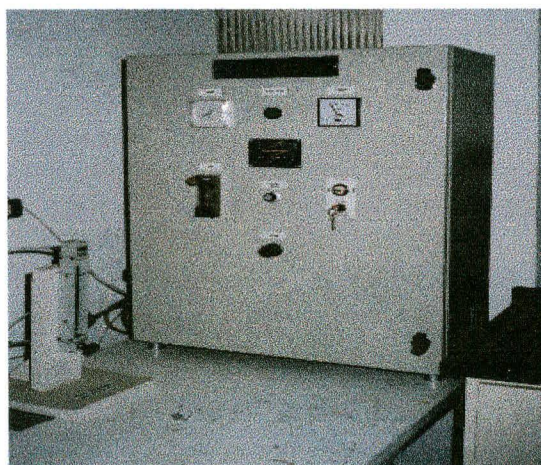


#### 4.4.3 Ensaio de Ozonização

##### 4.4.3.1 Unidade de Geração de Ozônio

O gerador de ozônio utilizado nesta etapa da investigação experimental, é fabricado pela Trailgaz, modelo LABO 6LO, produzindo ozônio a partir do ar atmosférico ou de oxigênio puro. A produção de ozônio ocorre pelo efeito Corona com capacidade de 10gO<sub>3</sub>/h com concentração de 18gO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> a partir de ar comprimido, e com capacidade de 22gO<sub>3</sub>/h com concentração de 40gO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> a partir de oxigênio puro. Todas as partes móveis do equipamento são de aço inoxidável e as linhas (mangueiras) que conduzem o ozônio/ar são de teflon. A produção de ozônio é controlada por ajuste na descarga elétrica, o qual é feito manualmente numa escala de 0 a 100% da produção máxima. O equipamento trabalha com tensões elevadas, necessitando de transformador monofásico de alta tensão, e é resfriado através de circulação contínua de água. Possui tamanho reduzido, trabalhando com pressões entre 7 e 8 atm.

Neste experimento o ozônio foi gerado a partir de oxigênio puro. A figura 17 mostra o aparelho gerador de ozônio.

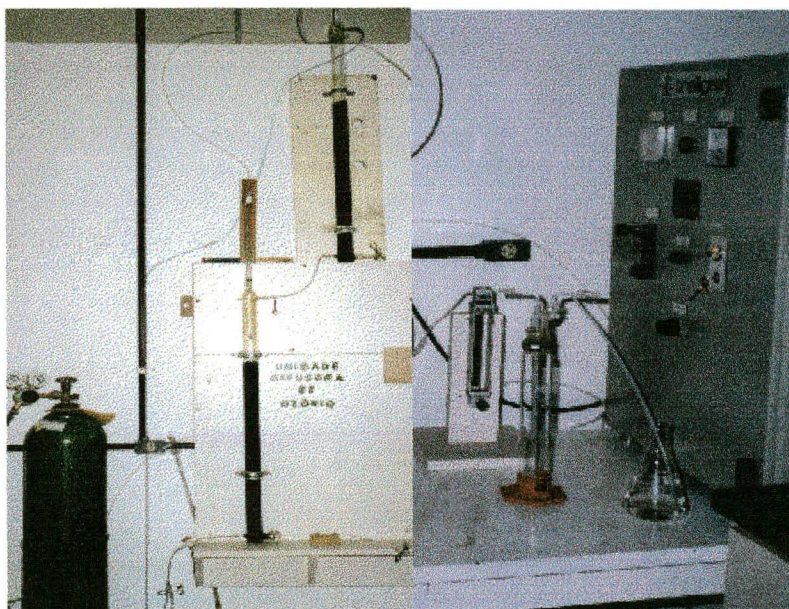


*Figura 17 – Aparelho de geração de ozônio*

##### 4.4.3.2 Conjunto Piloto de Ozonização

O efluente bruto foi ozonizado com diferentes concentrações através de um piloto de ozonização (mostrado na figura 18), composto por:

- Aparelho de ozonização, descrito anteriormente.
- Cilindro de oxigênio puro, fornecido pela White Martins.
- Rotômetro para gases – modelo P, fabricado pela Omel.
- Frascos lavadores – 500 ml, fabricado pela Anitel.
- Colunas de contato – feitas de vidro com 1,25 m de altura cada uma com 50 mm de diâmetro.
- Bomba Portátil 150, ACCU WELL – recirculação do efluente nas colunas.



*Figura 18 – Piloto de ozonização em descontínuo*

#### 4.4.3.3 Condições Experimentais e Transferência de Ozônio

Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente. O oxigênio foi introduzido no ozonizador à uma pressão regulada no cilindro de 6 bar (Kgf/cm<sup>2</sup>). Antes da entrada na célula geradora de ozônio, a pressão foi ajustada no aparelho de ozonização, em 0,5 bar (Kgf/cm<sup>2</sup>) através de um retentor de pressão.

O comando regulador de intensidade de potência era rotacionado até a posição desejada (5 e 10 W), indicada no wattímetro.

Saindo do aparelho de ozonização, o gás ozonizado passava por um rotômetro que estabelecia a vazão (20, 25 ou 30 l/h).



O volume de efluente nas colunas de contato era de 1350 ml na primeira e de 940 ml na segunda, que por meio de uma bomba recirculava a contra corrente da injeção do gás, que era injetado continuamente.

A transferência do ozônio para a massa líquida era realizada em coluna clássica de bolhas, injetando-se o gás através de um difusor poroso, situado na base da primeira coluna. O excesso de gás, ou seja, a parcela da mistura gasosa que não ficava retida na massa líquida, saía pelo topo da coluna, e era destruído por um destruidor catalítico.

A concentração de ozônio foi determinada pelo método iodométrico, onde o volume do gás era desviado para um frasco contendo iodeto de potássio.

A eficiência de transferência foi determinada pela diferença entre a concentração de ozônio no gás gerado pelo ozonizador (feed-gás), e a concentração de ozônio no gás que saía da coluna (off-gás), conforme a expressão abaixo:

$$Eficiência(E) = \frac{[O_3]_{feed\ gás} - [O_3]_{off\ gás}}{[O_3]_{feed\ gás}} \quad (21)$$

A concentração de ozônio transferida foi determinada pela seguinte equação:

$$[O_3]_{transferido} \text{ (mg/l)} = \frac{E \times [O_3]_{feed\ gás} \times Q_g \times t}{60 \times V_{ef}} \quad (22)$$

Sendo: E = eficiência de transferência (decimal);  $[O_3]$  = concentração de ozônio (mg/l);  $Q_g$  = vazão de gás (l/h); t = tempo de contato nas colunas (min);  $V_{ef}$  = volume de efluente nas colunas (l).

Utilizamos a concentração de ozônio transferido, pois a concentração de ozônio dissolvido na massa líquida não foi medido. Segundo NAYME (1997), as reações entre o ozônio e os corantes reativos são de cinéticas muito rápidas, e o ozônio dissolvido aparece somente após a eliminação quase que total dos corantes. Com estas informações e tendo em vista a dificuldade de determinação da concentração do ozônio dissolvido em efluentes fortemente coloridos, estabeleceu-se nesta pesquisa que todo o ozônio transferido à massa líquida seria imediatamente consumido na reação de descoloração.

Os efluentes ozonizados (várias concentrações) foram submetidos à ensaios de Jar Test, utilizando as dosagens otimizadas anteriormente, e dos ensaios que proporcionaram os

melhores resultados de cor e turbidez foram escolhidas as concentrações de ozônio que foram utilizadas para a ozonização em contínuo do efluente bruto.

#### *4.5 Etapa 2: OZONIZAÇÃO EM CONTÍNUO / PILOTO DE FLOCULAÇÃO*

Foram utilizados dois sistemas-piloto de ozonização em contínuo, um com misturador estático para a concentração de  $7\text{mgO}_3/\text{l}$ , e o outro com coluna de contato para a concentração de  $27\text{mgO}_3/\text{l}$  a qual decidiu-se analisar para avaliar os resultados com uma concentração maior de ozônio. Em razão de se procurar uma pequena concentração de ozônio que fosse efetiva na descoloração, adotou-se a concentração de  $7\text{ mgO}_3/\text{l}$  analisando os estudos feitos anteriormente por MELO FILHO (1997), e em função também dos melhores resultados obtidos nos estudos de NAYME (1997).

Após ozonizado o efluente era levado ao reservatório, que posteriormente alimentava o piloto de floculação.

O efluente bruto (sem polímero e sem ozônio) e o efluente tratado biologicamente também foram submetidos aos ensaios no piloto de floculação, para ser avaliada a eficiência do tratamento.

##### 4.5.1 Ozonização com Misturador Estático

###### 4.5.1.1 Conjunto Piloto de Ozonização

A unidade geradora de ozônio é a mesma descrita no item 4.4.3.1. A ozonização foi realizada com misturador estático, modelo SULZER-SMV, com 6 módulos, medindo individualmente,  $21 \times 21\text{ mm}$  (figura 11), dispostos verticalmente, em série, no interior de um tubo cilíndrico, com um giro de  $90^\circ$  em relação ao módulo anterior. O conjunto piloto pode ser visualizado na figura 19.



*Figura 19 – Piloto de ozonização com misturador estático*

#### 4.5.1.2 Condições Experimentais e Transferência de Ozônio

O ozônio foi aplicado no efluente bruto por injeção direta em linha, à montante do misturador estático, onde se dá a transferência do ozônio para o efluente, conforme esquema da figura 20. Segundo LAPLANCHE (1995), citado por RAMON (1999), para obter bons resultados na transferência deve-se observar a relação entre vazão do gás e vazão do efluente, de modo que  $Q_g/Q_{ef} \leq 0,15$ .



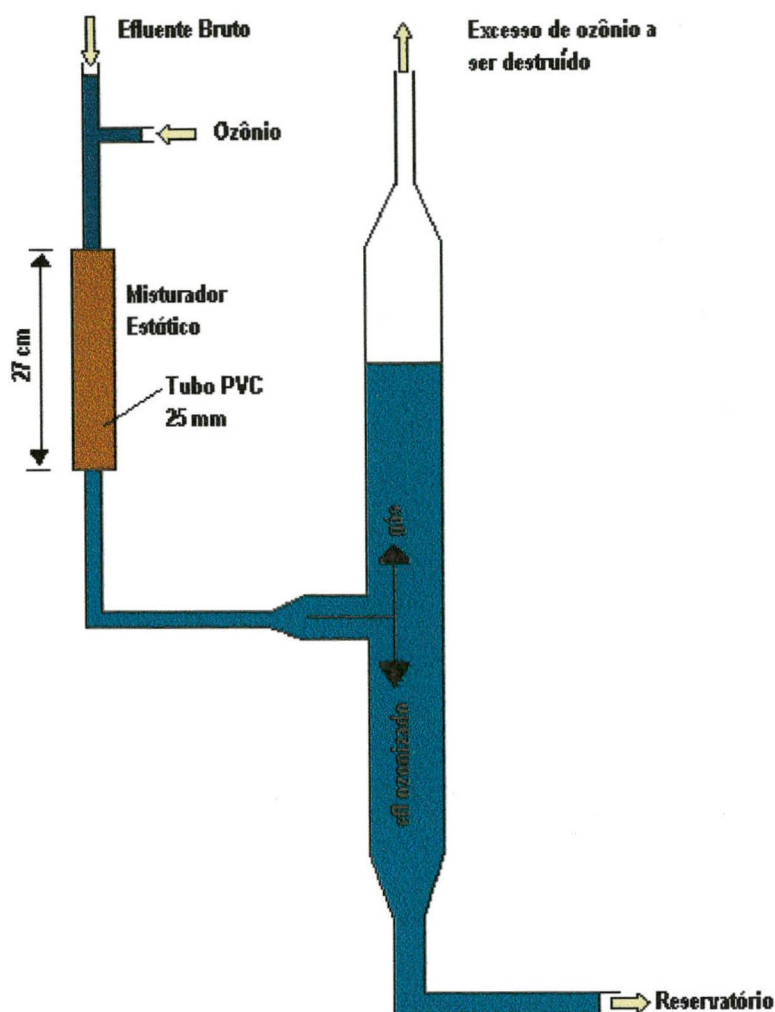


Figura 20 - Esquema de funcionamento da unidade de transferência de ozônio

Neste piloto de ozonização, a concentração de ozônio não pode ser aumentada em função das limitações do gerador de ozônio, e também do sistema de transferência utilizado, que trabalhou dentro da relação  $Q_g/Q_{ef}$  recomendada por LAPLANCHE.

A vazão de efluente na entrada do misturador estático foi fixada em 250 l/h, com fluxo vertical descendente, e a vazão de gás foi fixada em 30 l/h ( $1 \text{ kgf/cm}^2 - 21 \text{ }^\circ\text{C}$ ), controladas através de rotâmetros. A pressão ajustada no aparelho de ozonização foi de  $0,7 \text{ bar (Kgf/cm}^2)$ , e a potência em 10 W.

A eficiência de transferência de ozônio para o efluente foi determinada da mesma forma que na Etapa 1. Já a concentração de ozônio aplicada foi determinada conforme a expressão abaixo:

$$[O_3]_{transferido} = \frac{E \times [O_3]_{feed} \times Q_g}{Q_{ef}} \quad (23)$$

Onde:  $E$  = eficiência de transferência (decimal);  $[O_3]_{\text{feed-gás}}$  = concentração de ozônio gerada pelo ozonizador (mg/l);  $Q_g$  = vazão do gás ozônio (l/h);  $Q_{ef}$  = vazão de efluente (l/h).

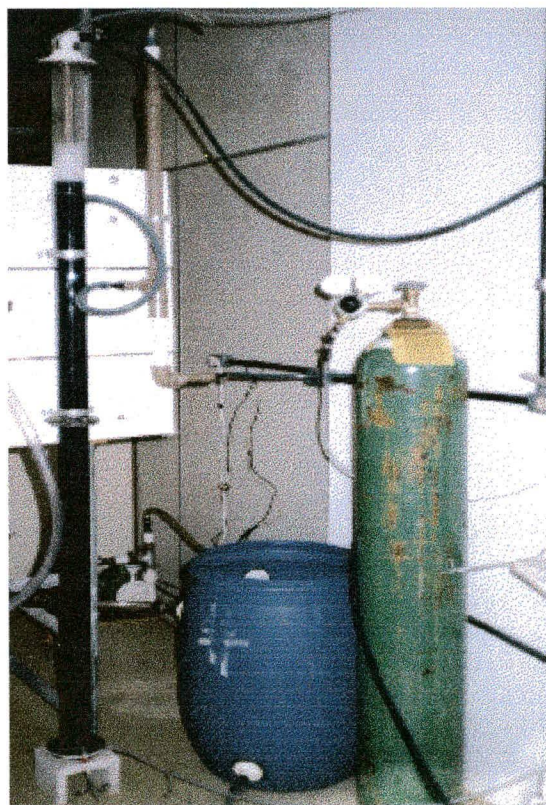
Após ser ozonizado, o efluente foi acondicionado nos reservatórios, onde o pH era corrigido, e seguia por bombeamento até o piloto de floculação descrito no item 4.2.

Análises de DQO total e Sólidos Totais foram realizadas com os efluentes bruto, ozonizado e decantado. Para as análises de DQO solúvel, COD e Sólidos Suspensos, os efluentes foram filtrados à vácuo em filtro de membrana de acetato de celulose de  $0,45 \mu$ .

#### 4.5.2 Ozonização com Coluna de Contato

##### 4.5.2.1 Conjunto Piloto de Ozonização

A unidade geradora de ozônio é a mesma descrita no item 4.4.3.1. A ozonização foi realizada em uma coluna de acrílico de 2 m de altura com diâmetro de 60 mm, conforme figura 21.



*Figura 21 – Piloto de ozonização com coluna de contato*

#### 4.5.2.2 Condições Experimentais e Transferência de Ozônio

O ozônio foi injetado na coluna de contato através de um difusor poroso situado na base da mesma.

O efluente entrava na coluna pela parte superior, e um pouco mais abaixo havia um orifício para saída do efluente ozonizado. O volume de líquido na coluna era de aproximadamente 5 litros.

A pressão ajustada no aparelho de ozonização foi de 0,7 bar (Kgf/cm<sup>2</sup>), e a potência em 10 W.

A vazão de gás foi estabelecida em 30 l/h, e a vazão de efluente em 60 l/h, controladas por rotâmetros.

A concentração e a eficiência de transferência de ozônio para o efluente foi determinada da mesma forma utilizada na ozonização com misturador estático.

Após a ozonização, o efluente era acondicionado nas caixas de reservação, corrigido o pH se necessário, e por bombeamento era levado até o piloto de floculação, como descrito no item 4.2.

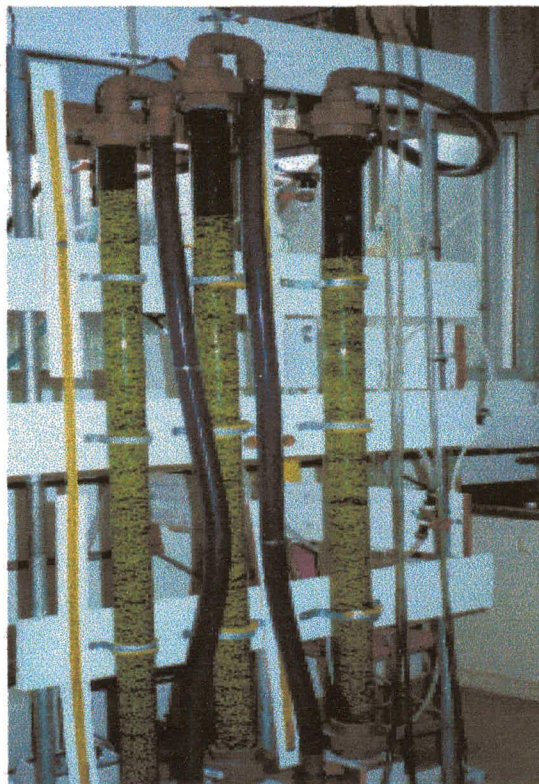
As análises de DQO, COD e Sólidos foram feitas como descritas anteriormente.

Nesta fase de ensaios com o piloto de floculação, também foi analisado o efluente pré-ozonizado (7 mgO<sub>3</sub>/l) tratado em um reator biológico (aeróbio de leito fluidizado, trifásico), que era o processo de tratamento de uma outra pesquisa realizada no mesmo laboratório, por Kelli Cristina Grando Alves.

#### 4.5.3 Piloto de Floculação

O piloto de floculação (figura 22), era formado por três colunas de vidro, com aproximadamente 2 m de altura cada uma, apresentando diâmetros internos de 60, 65 e 70 mm respectivamente, de fluxo ascendente com expansão do meio granular. Foi necessário algumas modificações neste piloto pois anteriormente foi realizada uma outra pesquisa onde foi estudada a floculação em meio granular expandido com diferentes tipos de água, realizada por CUBAS, 1999.





*Figura 22 – Piloto de floculação*

As colunas eram ligadas entre si através de mangueira plástica cristal de 35 mm de diâmetro interno.

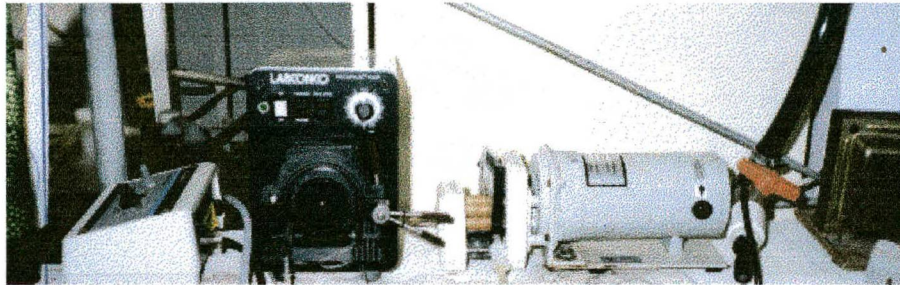
O meio granular era composto por esferas de polietileno de alto impacto, de 6 mm de diâmetro e com uma densidade de 1,016.

Após a última coluna foi instalado um decantador feito de vidro, com 200 mm de diâmetro e 500 mm de altura, possuindo dois orifícios, um localizado na parte inferior que servia para coletar as amostras para análise da água floculada e decantada, nos tempos de decantação de 4 e 7 minutos, e o outro na parte superior para saída do efluente. Como as coletas eram feitas em descontínuo a cada 20 minutos, para manter o funcionamento contínuo do piloto, era fechado um registro situado entre a última coluna e o decantador, seguindo o efluente por uma saída lateral.

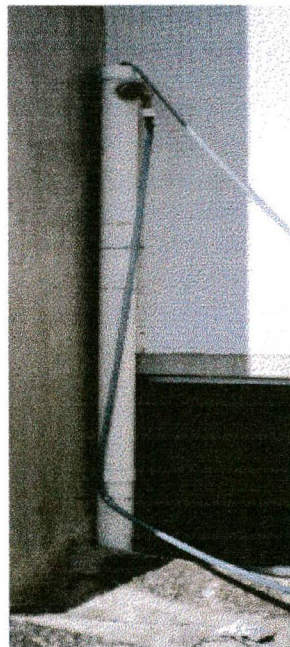
A dosagem do coagulante acontecia na própria tubulação de entrada do piloto, que sofria um estrangulamento em seu diâmetro, que em seguida aumentava novamente, provocando assim uma turbulência na ordem de  $G \cong 800s^{-1}$  (mistura rápida). A dosagem era feita através de uma bomba peristáltica Máster Flex – COLE PARMER, Instrument Company, modelo 7553-70.

Logo em seguida, na mesma tubulação, era feita a dosagem do polímero, também através de uma bomba peristáltica (LABCONCO, modelo 426-2000). A figura 23a mostra as bombas dosadoras.

O piloto foi alimentado com efluente têxtil, através de uma bomba submersa para uma câmara de carga (figura 23b) localizada a seis metros de altura em relação a entrada do piloto.



*Figura 23a – Bombas peristálticas, para dosagem de sulfato de alumínio e polímero*



*Figura 23b - Câmara de carga*

#### *4.6 Etapa 3: OZONIZAÇÃO DO EFLUENTE DECANTADO (descontínuo)*

Nesta etapa do experimento, ensaios de Jar-Test foram realizados com o efluente bruto utilizando as dosagens otimizadas na Etapa 1.

O efluente floculado e decantado foi então submetido à ozonização em diferentes concentrações, para avaliação dos resultados.



#### 4.6.1 Conjunto Piloto de Ozonização

A unidade geradora de ozônio e o piloto de ozonização foram os mesmos utilizados na Etapa 1.

#### 4.6.2 Condições Experimentais e Transferência de Ozônio

As condições experimentais foram as mesmas da Etapa 1. A eficiência de transferência e a concentração de ozônio também foram calculadas conforme a Etapa 1.

Análises de cor e turbidez foram feitas para os efluentes bruto (sem ozônio), decantado e ozonizado.

### 4.7 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

As principais análises realizadas nos efluentes bruto, ozonizado e decantado foram: pH, cor, turbidez, sólidos, DQO (Demanda Química de Oxigênio) e COD (Carbono Orgânico Dissolvido). Análises auxiliares foram feitas para caracterização do efluente bruto como a alcalinidade, DBO<sub>5</sub> (Demanda Bioquímica de Oxigênio), temperatura e condutividade.

Os reagentes utilizados neste experimento foram preparados com produtos químicos (PA) de alto grau de pureza. A diluição foi feita com água deionizada. Convém também ressaltar que todas as vidrarias e recipientes utilizados na preparação dos reagentes e na realização dos ensaios, foram lavados com água tratada e, posteriormente enxaguados com água destilada.

#### 4.7.1 pH e Temperatura

O pH foi medido em aparelho de bancada ORION, modelo 210 A, e a temperatura foi medida com termômetro de mercúrio.

#### 4.7.2 Turbidez

A turbidez é uma medida de resistência do líquido à passagem da luz, causada pela presença de materiais em suspensão. Estes materiais podem ser partículas maiores que se

depositam, ou partículas menores que permanecem em suspensão por muito tempo (partículas coloidais).

A turbidez foi obtida através de leitura instrumental e baseada na nefelometria (NTU) em turbidímetro de bancada, modelo 2100 N da HACH.

#### 4.7.3 Cor

A cor foi medida através da leitura em espectrofotômetro (modelo DR/4000 UV-VIS da HACH) da absorvância no comprimento de onda de máxima absorvância do efluente bruto, na faixa do visível, que para o efluente em análise foi de  $\lambda = 666$  nm. Não existe uma metodologia normatizada para a determinação da coloração de efluentes industriais, dificultando com isso, a comparação dos resultados dos estudos relacionados ao tratamento de efluentes têxteis.

#### 4.7.4 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A determinação da DQO (total e solúvel), foi realizada pelo método colorimétrico, descrito no Standard Methods (APHA, 1992). As análises foram realizadas em COD Reactor da HACH e em espectrofotômetro marca VARIAN, modelo Cary 1E – UV-Visible, previamente calibrado.

#### 4.7.5 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A determinação da DBO<sub>5</sub> foi realizada pelo método manométrico, descrito no Standard Methods (APHA, 1992).

#### 4.7.6 Sólidos (Totais, Suspensos, Sedimentáveis)

Os testes para determinação das diversas formas de resíduos são de natureza empírica e não determinam substâncias químicas específicas, mas sim classes de substâncias que têm semelhantes propriedades físicas e respostas à secagem e à ignição.

O método utilizado para a medição dos sólidos foi o gravimétrico, descrito no Standard Methods (APHA, 1992).

#### 4.7.7 Carbono Orgânico Dissolvido (COD)

O carbono orgânico dissolvido é considerado a fração do carbono orgânico total (COT), que passa por um filtro com porosidade de 0,45  $\mu$ , conforme descrito no Standard Methods (APHA, 1992). A análise foi feita em aparelho TOC-5000A da SHIMADZU, através do NPOC (Carbono Orgânico não Purgável) que converte carbonatos inorgânicos a  $\text{CO}_2$  com ácido, e remove o  $\text{CO}_2$  através de borbulhamento antes da injeção da amostra. O aparelho foi calibrado com curva de 4 pontos, obtendo-se o coeficiente de variação menor que 2% e/ou desvio padrão menor que 200.

#### 4.7.8 Alcalinidade

Alcalinidade é a medida da capacidade que as águas tem de neutralizar ácidos. Embora sejam várias as substâncias que conferem alcalinidade à massa líquida, as principais são os hidróxidos, os carbonatos e os bicarbonatos.

A alcalinidade foi obtida pelo método titulométrico com uso de indicadores conforme descrito no Standard Methods (APHA, 1992).

#### 4.7.9 Condutividade

A condutividade foi medida em aparelho portátil ORION.

## CAPÍTULO V

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 5.1 CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE TÊXTIL

O efluente utilizado neste experimento, originado da Indústria Têxtil Damyller, apresenta as características físico-químicas conforme descritas na Tabela 4, apresentada a seguir.

Tabela 4 – Principais características médias do efluente em estudo

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valores</b>
pH		6,5 a 7,5
Alcalinidade	mg/l CaCO <sub>3</sub>	496
ABS - $\lambda=666\text{nm}$		1,080
Turbidez	NTU	270
DBO <sub>5</sub>	mg/l	328
DQO <sub>solúvel</sub>	mg/l	646
DQO <sub>total</sub>	mg/l	961
Sólidos Totais	mg/l	1477
ST Dissolvidos	mg/l	1298
ST Suspensos	mg/l	179
ST Sedimentáveis	ml/l	3
COD	mg/l	242
Condutividade	$\mu\text{S/cm}$	2450



## 5.2 ESTUDO EM DESCONTÍNUO (Etapa 1)

### 5.2.1 Coagulação-Floculação

Para os ensaios de coagulação-floculação, testes de jarros foram realizados com o efluente bruto, objetivando a otimização dos parâmetros para a tratabilidade do efluente têxtil.

#### 5.2.1.1 Determinação do Melhor pH de Floculação (série 1)

Segundo KAWAMURA (1996), o pH de floculação em torno de 6 e 7, está numa variação efetiva para floculação com sulfato de alumínio.

As figuras 24 e 25 apresentam a redução de cor e turbidez em função de diferentes valores de pH do efluente bruto, mediante a adição de alcalinizante (cal) e coagulante (sulfato de alumínio); este ensaio foi realizado com objetivo de determinar o pH ótimo de floculação.

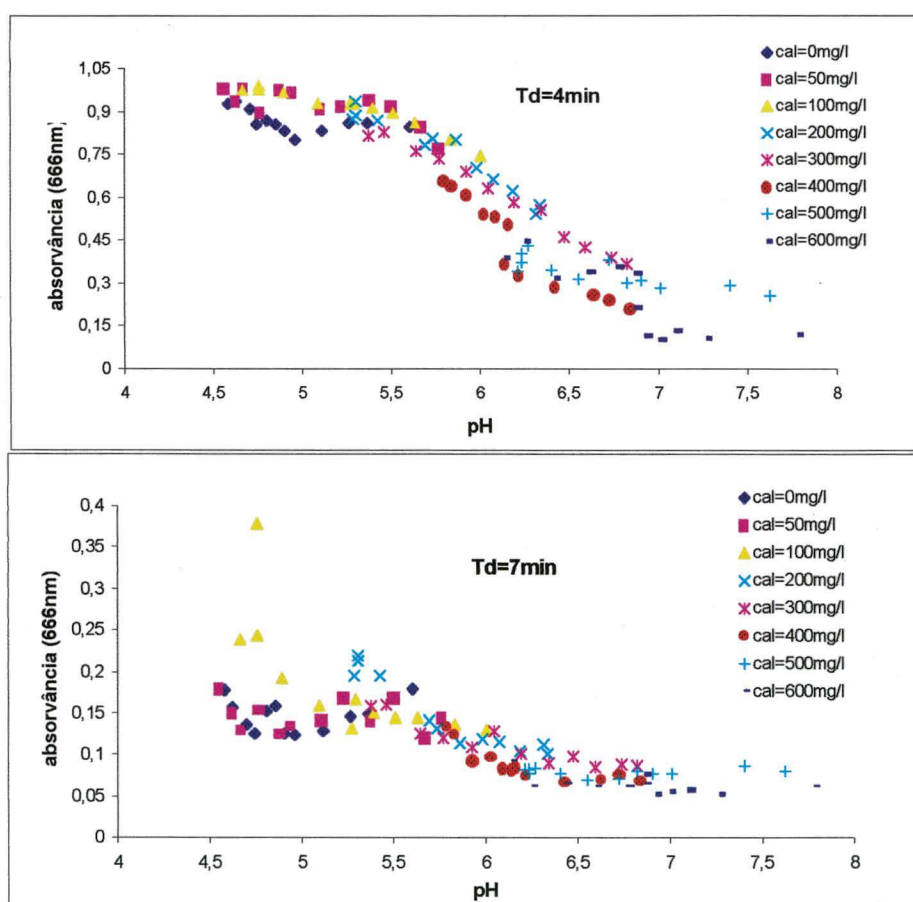


Figura 24 - Redução da cor (absorvância) em função da dosagem de cal e do pH para tempos de decantação de 4 min ( $vs=1,75$  cm/min) e 7 min ( $vs=1$  cm/min)

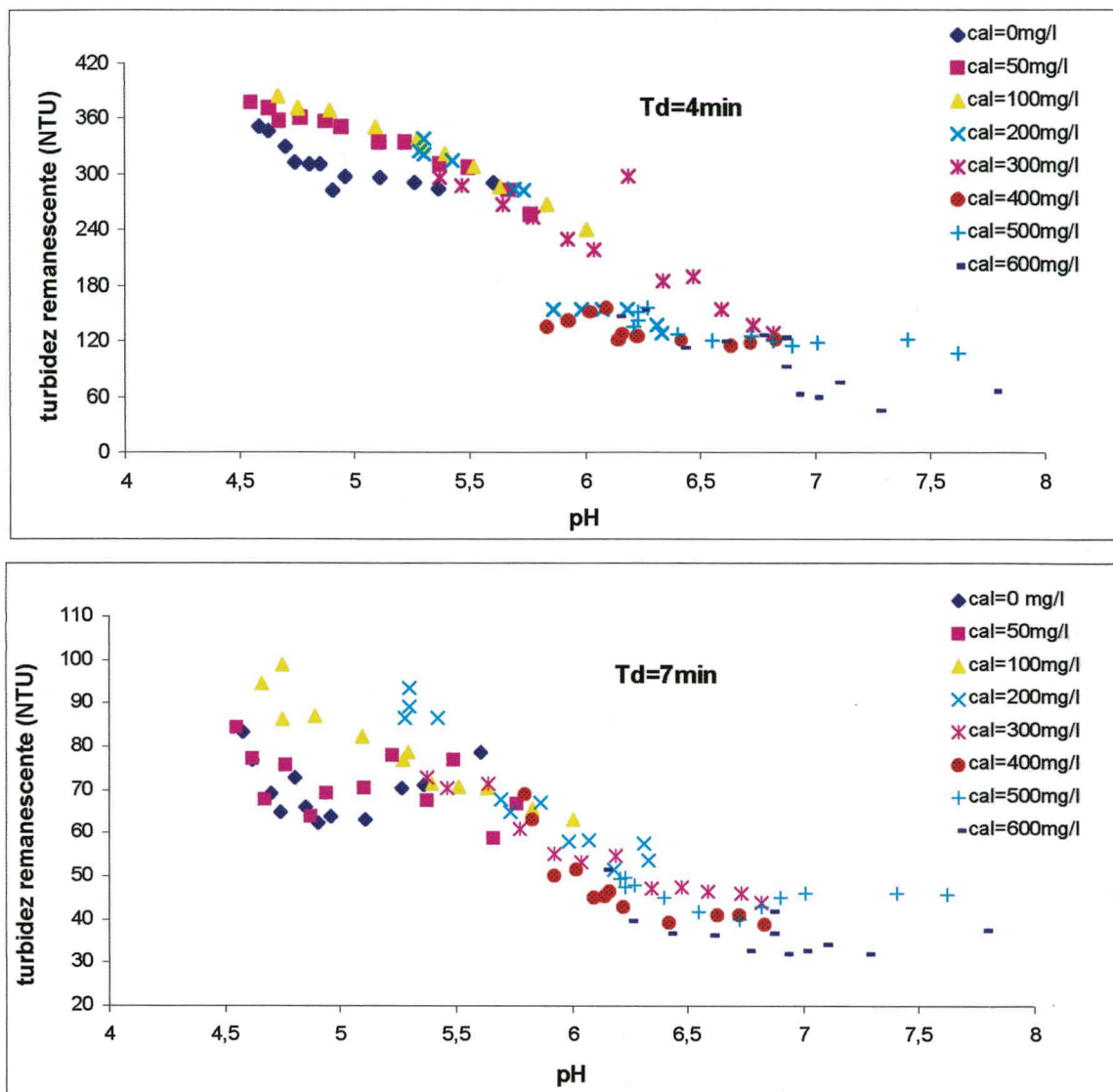


Figura 25 - Redução da turbidez em função da dosagem de cal e do pH para tempos de decantação de 4 min ( $vs=1,75\text{cm/min}$ ) e 7 min ( $vs=1\text{cm/min}$ )

Os melhores resultados de pH, em termos de redução de cor e turbidez, que foram obtidos nos reatores do aparelho Jar Test no ensaio de coagulação-floculação, foram os próximos de 7,27 que corresponde à concentração aplicada de 600 mg/l de óxido de cálcio (cal). Este resultado pode ser constatado, verificando-se as figuras anteriores e os valores dos ensaios de coagulação-floculação, descritos no Anexo 1.

A figura 26 mostra o gráfico do pH em função das aplicações de sulfato de alumínio e cal.

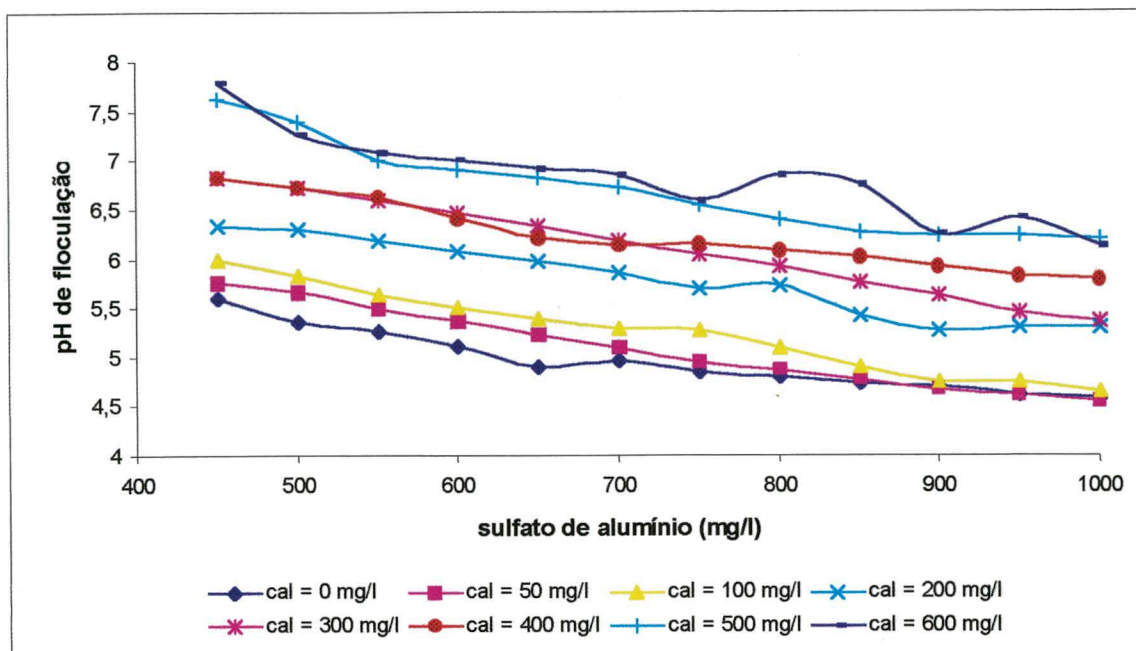


Figura 26 - pH de floculação em relação às aplicações de sulfato de alumínio e cal

Como pode ser observado nas Figuras 24 a 26, a dosagem de 600 mg/l de cal é a que melhor resultado obteve na redução de cor e turbidez, numa faixa ótima de pH.

#### 5.2.1.2 Determinação da Dosagem Ótima de Coagulante (série 1)

As dosagens de coagulante utilizadas no processo de coagulação-floculação de uma estação de tratamento de efluentes têxteis, podem variar de 500 a 2000 mg/l.

As figuras 27 e 28 mostram a determinação da melhor dosagem de sulfato de alumínio em função da dose de cal e da turbidez ou absorvância, nos tempos de decantação de 4 e 7 minutos.

Os ensaios poderão ser vistos no Anexo 1.

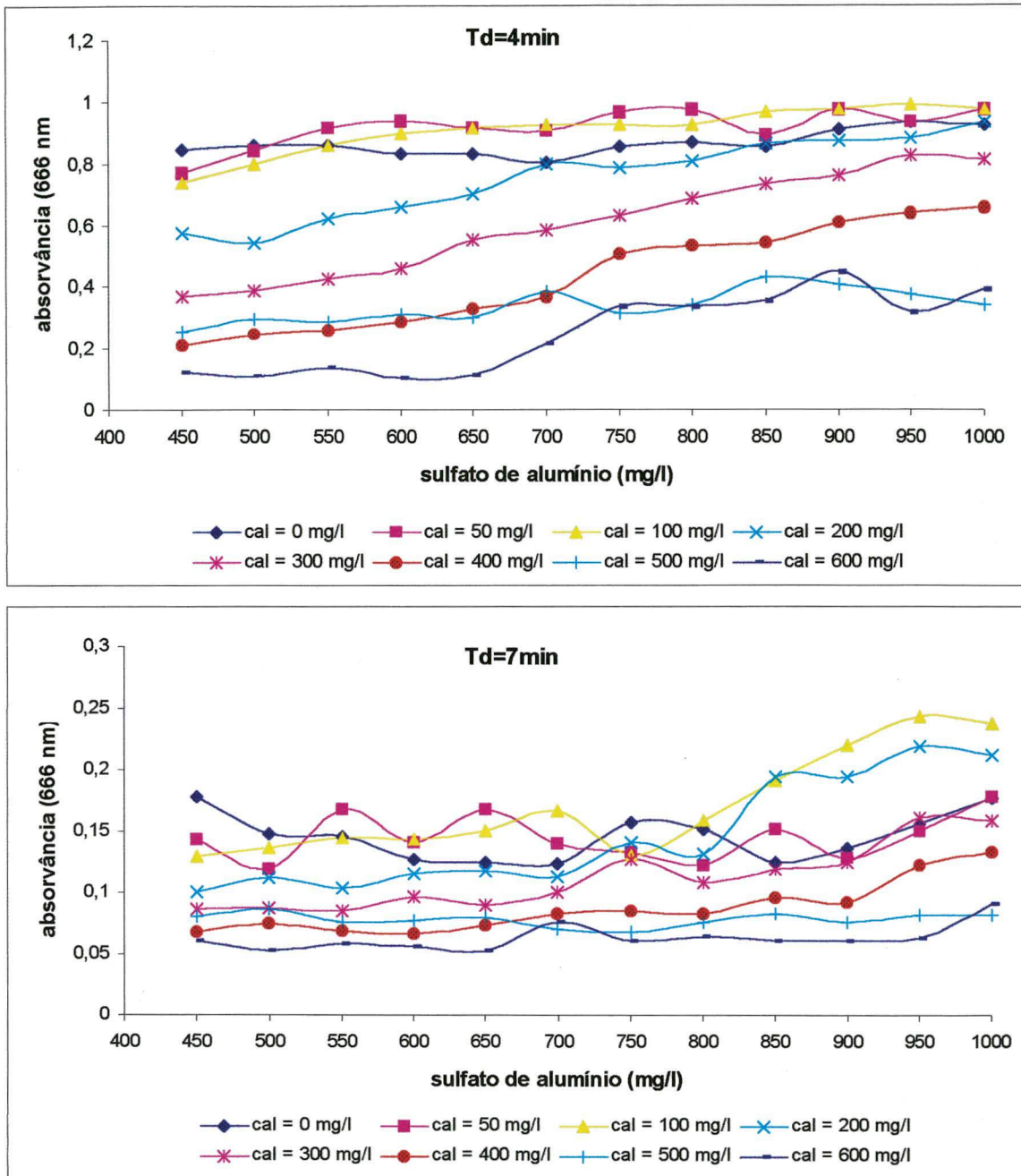


Figura 27 – Redução da cor (absorvância) em função da dosagem de sulfato de alumínio e de cal para tempos de decantação de 4 min ( $vs=1,75\text{cm/min}$ ) e 7 min ( $vs=1\text{cm/min}$ )



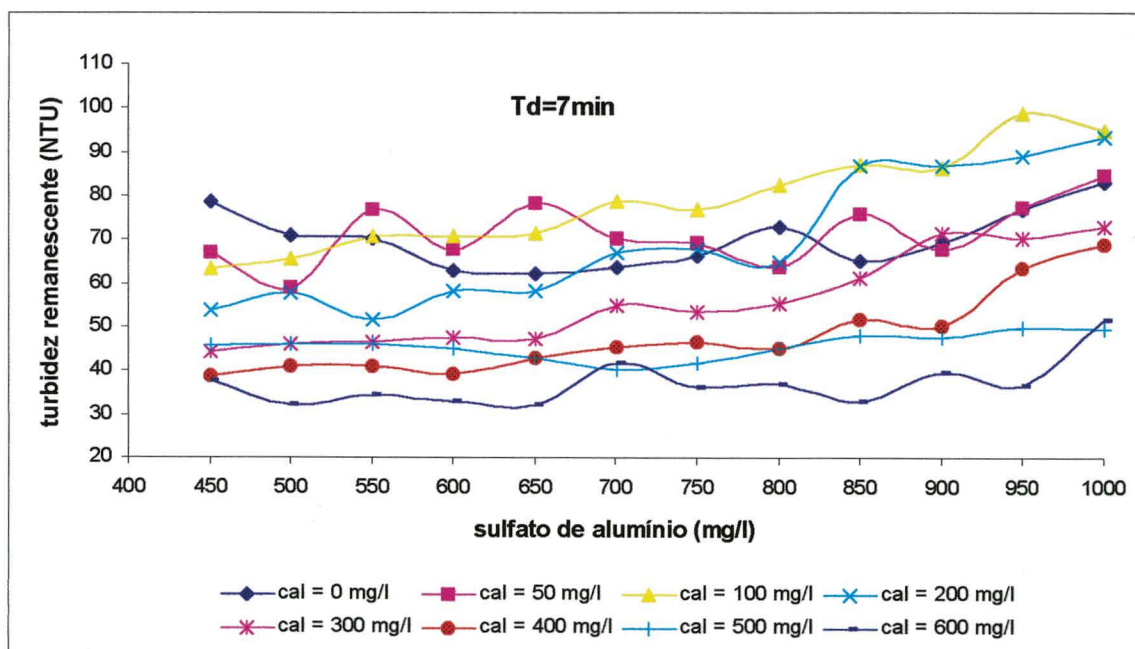
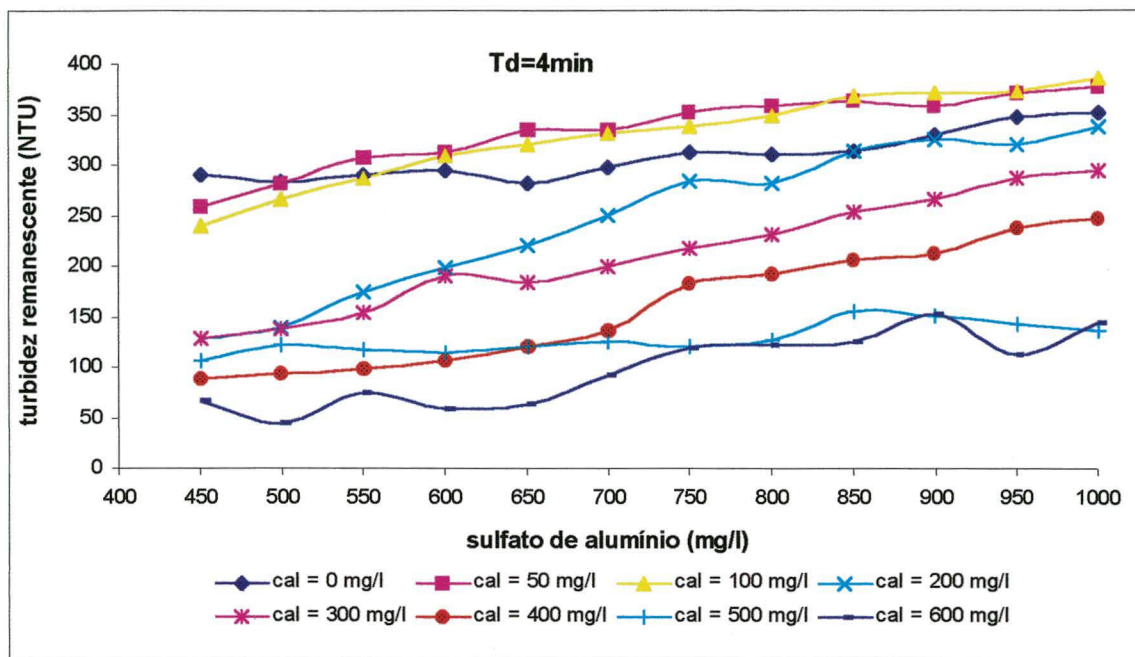


Figura 28 - Redução da turbidez em função da dosagem de sulfato de alumínio e de cal para tempos de decantação de 4 min ( $vs=1,75\text{cm/min}$ ) e 7 min ( $vs=1\text{cm/min}$ )

Como pode ser observado, para a dosagem de 600 mg/l de cal, obteve-se uma dosagem ótima de sulfato de alumínio de 500 mg/l, que corresponde a uma turbidez de 32,1 NTU e de 0,052 de absorvância (cor) para um tempo de decantação de 7 minutos. Estes valores de turbidez e cor correspondem a uma eficiência de remoção de 86% e 94%, respectivamente. A turbidez e a cor do efluente bruto ficava em torno de 270 e 1,08, respectivamente.

### 5.2.1.3 Determinação da Melhor Dosagem de Polímero (série 2)

No final da série 1, foram escolhidos 3 pontos que representaram regiões do diagrama de coagulação que forneceram bons resultados de remoção de cor e turbidez, que foram utilizados para escolher a melhor dosagem de polímero. A tabela 5, apresenta as características dos pontos escolhidos.

Tabela 5 – Características dos pontos escolhidos no diagrama de coagulação

<b>Características dos Ensaio</b>	<b>Ponto A1</b>	<b>Ponto A2</b>	<b>Ponto A3</b>
Dosagem de Sulfato de Alumínio (mg/l)	500	550	500
Dosagem de Cal (mg/l)	300	400	600
pH de coagulação	6,73	6,63	7,27
Turbidez remanescente (NTU) Td = 4 min	138	98,3	44,5
Abs <sub>666</sub> (cor) Td = 4 min	0,388	0,257	0,108
Turbidez remanescente (NTU) Td = 7 min	45,9	40	32,1
Abs <sub>666</sub> (cor) Td = 7 min	0,087	0,069	0,052

Para cada ponto escolhido, foi determinado a melhor dosagem de polímero, sendo que num ensaio o polímero foi aplicado após a mistura rápida, e no outro, 3 minutos depois de iniciar a mistura lenta. Os resultados dos ensaios se encontram no Anexo 2.

As figuras 29 a 32 mostram a determinação da dosagem de polímero em relação a turbidez e absorvância, num tempo de decantação de 2, 4, 5,5, e 7 minutos, que correspondem a uma velocidade de sedimentação de 3,5 cm/min, 1,75 cm/min, 1,27 cm/min e 1,0 cm/min, respectivamente.

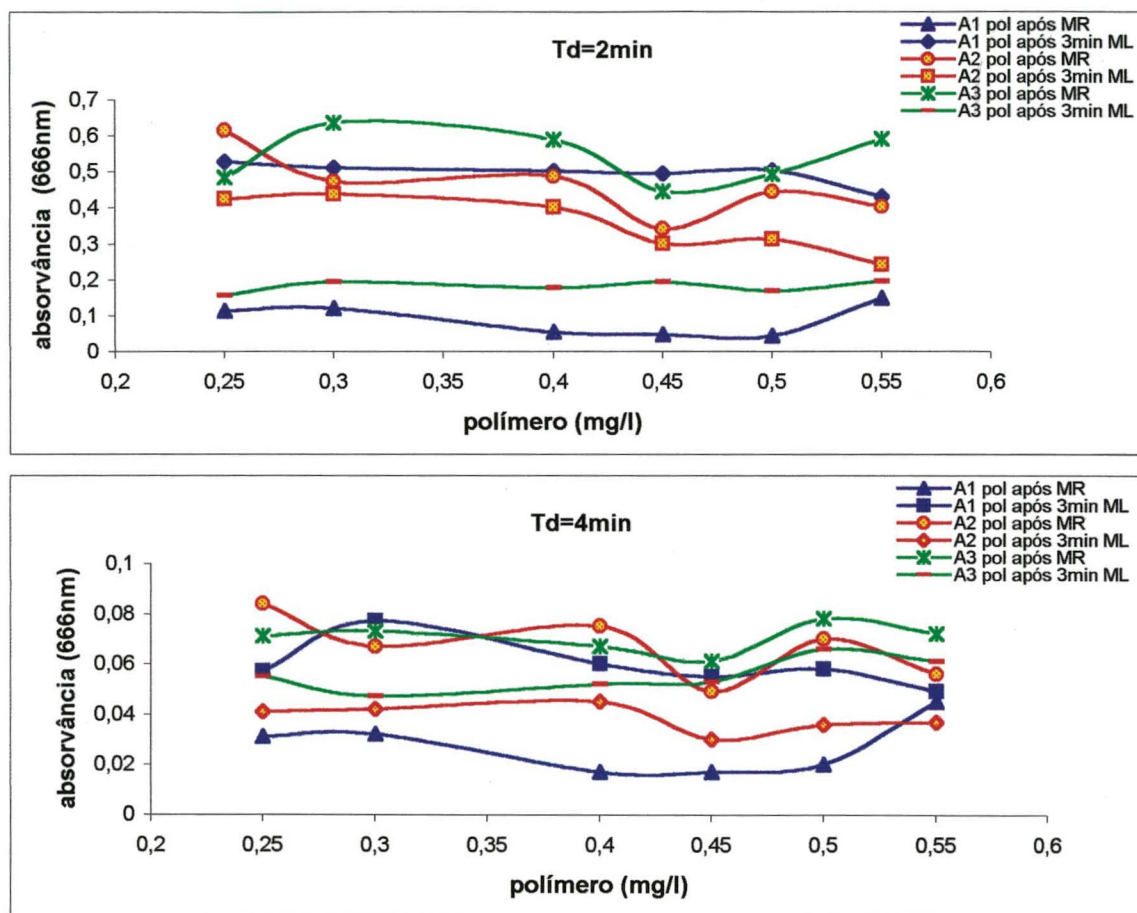


Figura 29 - Redução da cor (absorvância) em função das dosagens de polímero para tempos de decantação de 2 min ( $vs=3,5\text{cm/min}$ ) e 4 min ( $vs=1,75\text{cm/min}$ )

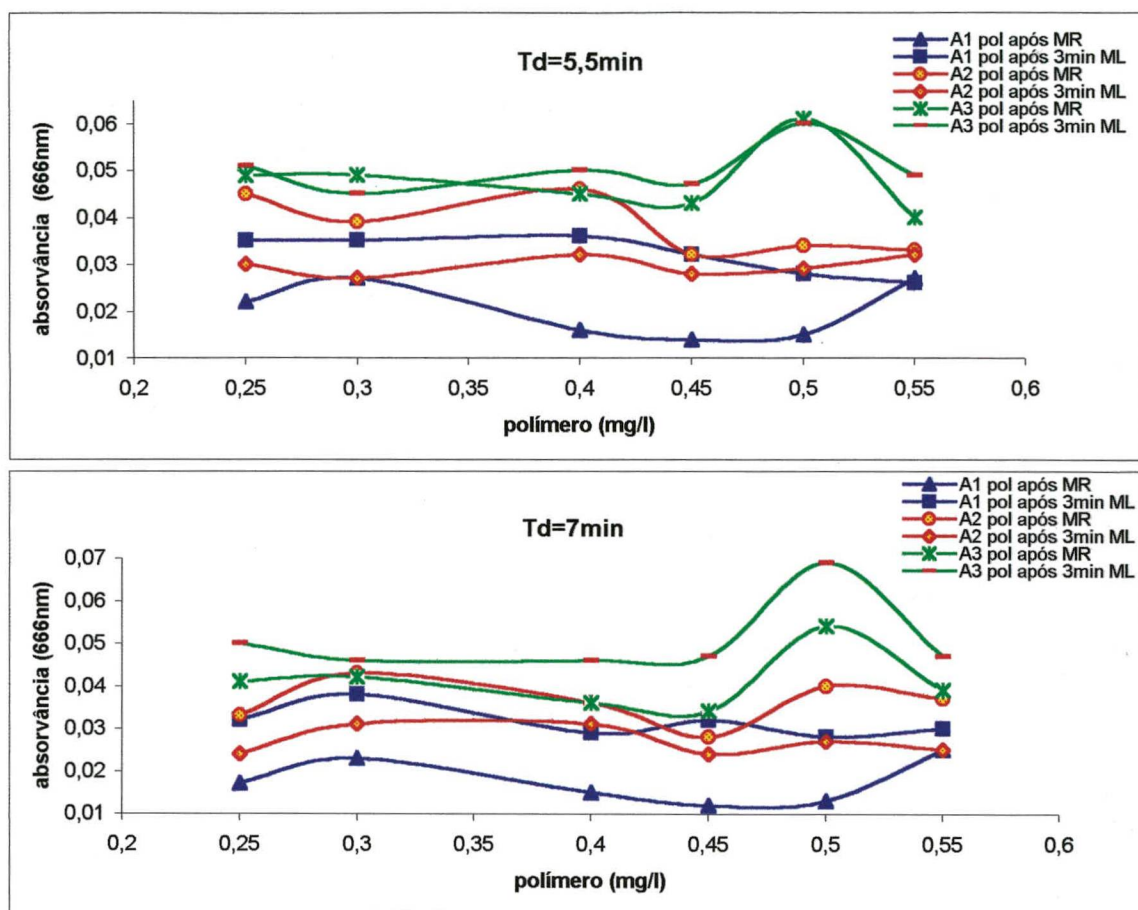


Figura 30 - Redução da cor (absorvância) em função das dosagens de polímero para tempos de decantação de 5,5 min ( $v_s=1,27\text{cm/min}$ ) e 7 min ( $v_s=1\text{cm/min}$ )



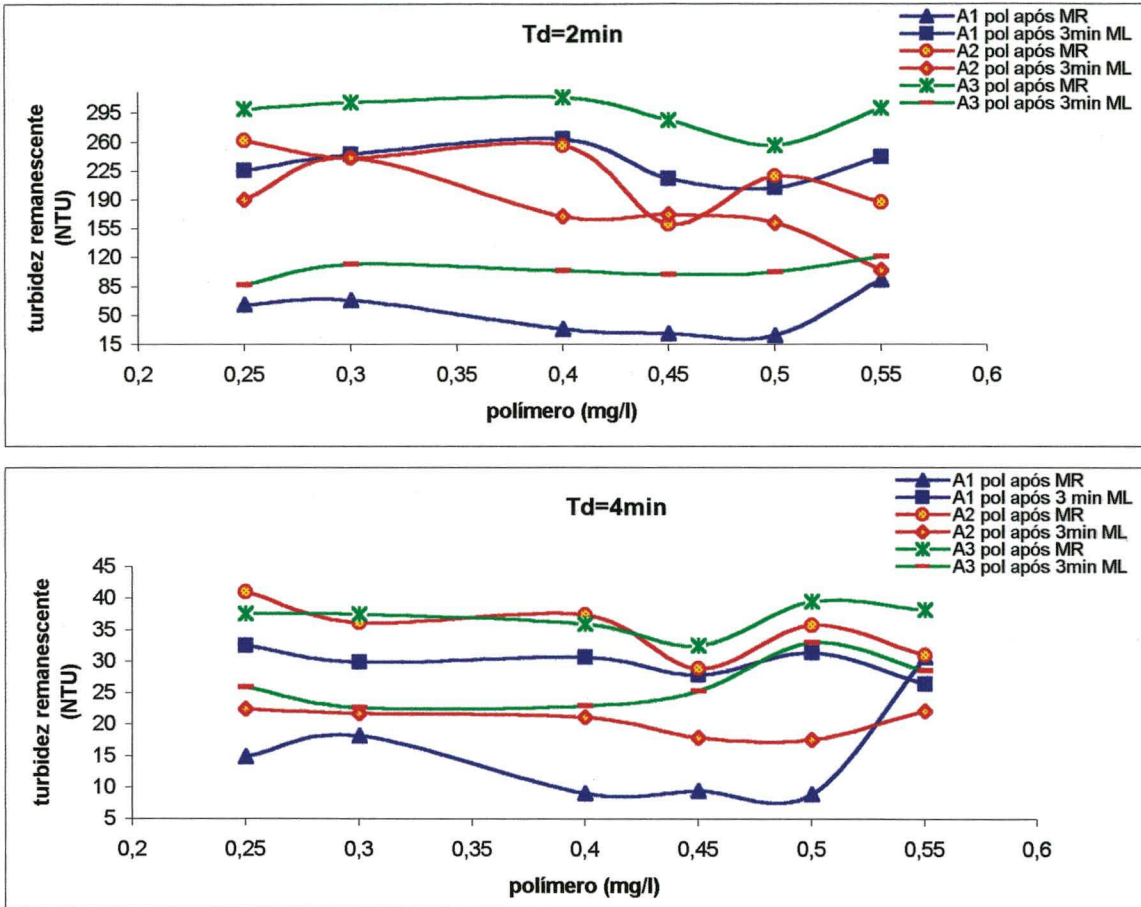


Figura 31 - Redução da turbidez em função da dosagem de polímero para tempos de decantação de 2 min ( $v_s=3,5\text{cm/min}$ ) e 4 min ( $v_s=1,75$ )

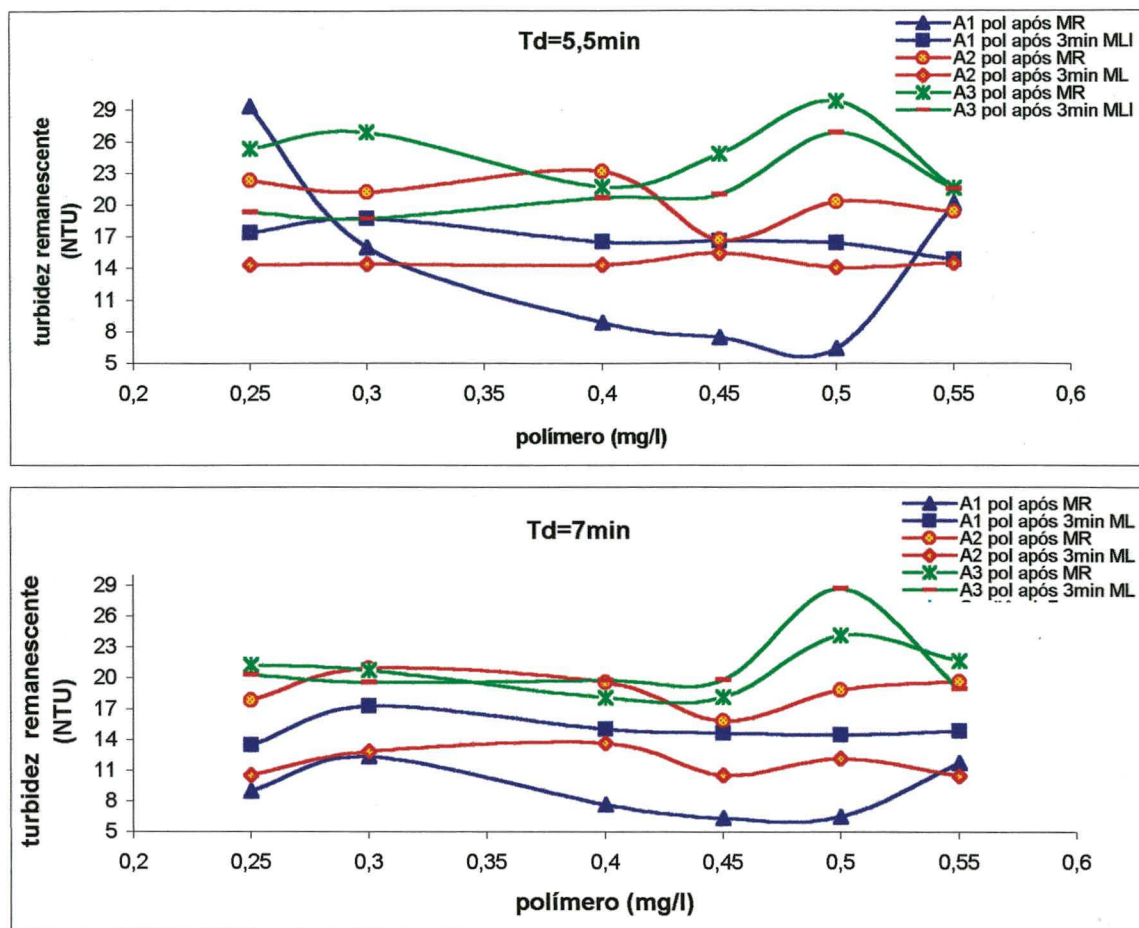


Figura 32 - Redução da turbidez em função da dosagem de polímero para tempos de decantação de 5,5 min ( $vs=1,27\text{cm/min}$ ) e 7 min ( $vs=1\text{cm/min}$ )

Como pode ser observado, a melhor dosagem de polímero foi de 0,45 mg/l para todos os ensaios. Pode ser observado também que com a utilização do polímero, o ponto A1 foi o que obteve melhores resultados de remoção de cor e turbidez. Portanto o ponto A1 será considerado para os ensaios com polímero, e o ponto A3 será considerado para os ensaios sem polímero. Também pode ser observado que com a utilização do polímero, o dosagem de cal foi reduzida pela metade, sendo isso importante pois reduzindo a cal se reduzirá a quantidade de lodo gerada no processo.

### 5.2.1.4 Determinação do Melhor Gradiente e Tempo de Mistura Rápida (série 3)

Com os pontos escolhidos nas séries 1 e 2 (com e sem polímero), e com as dosagens otimizadas, foram realizados ensaios para determinar o melhor gradiente de velocidade e o melhor tempo para a mistura rápida. Os valores obtidos nos ensaios encontram-se no anexo 3.

As figuras 33 e 34 mostram os gráficos para a determinação do melhor gradiente e o melhor tempo para a mistura rápida, em relação a cor e turbidez num tempo de decantação de 4 e 7 minutos.

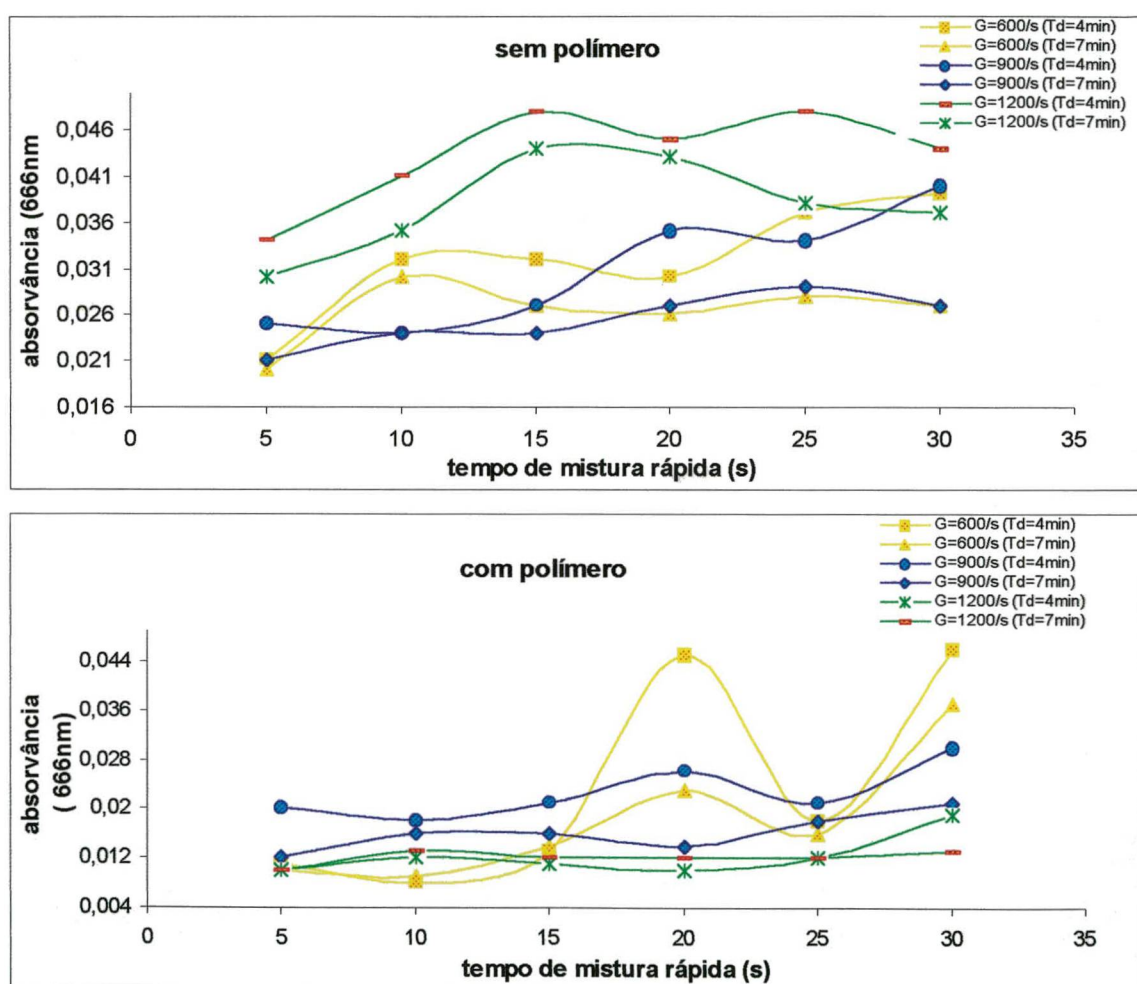


Figura 33 - Redução da cor (absorvância) em função do gradiente de velocidade e tempo de mistura rápida, sem polímero e com polímero

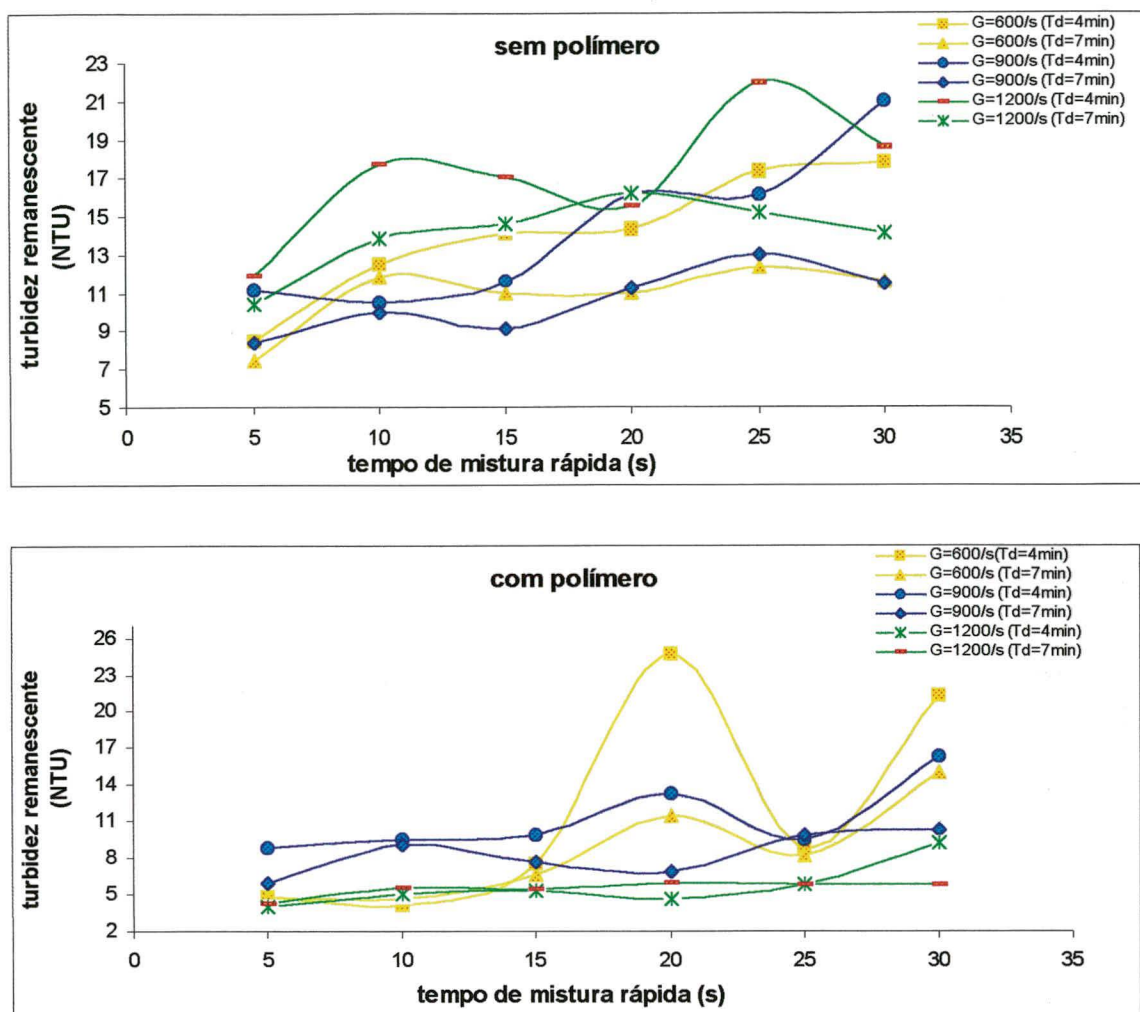


Figura 34 - Redução da turbidez em função do gradiente e tempo de mistura rápida, sem polímero e com polímero

Como pode ser visto nos gráficos, o melhor resultado de remoção de cor e turbidez foi obtido com um gradiente de velocidade  $G = 600 \text{ s}^{-1}$ , com um tempo de mistura rápida de 5 segundos para o ensaio sem polímero; para o ensaio com polímero, o melhor gradiente foi  $G = 1200 \text{ s}^{-1}$ , com um tempo de mistura rápida também de 5 segundos.

#### 5.2.1.5 Determinação do Melhor Gradiente e Tempo de Flocação (série 4)

Com os parâmetros otimizados nas séries 1, 2 e 3 (com e sem polímero), foram realizados os ensaios para determinação do melhor gradiente de velocidade para a flocação, como também o melhor tempo de flocação. Os resultados destes ensaios se encontram no Anexo 4.



As figuras 35 a 38 mostram os gráficos com diversos gradientes de velocidade, para a determinação do melhor tempo e melhores gradientes para a floculação (floculador com 3 câmaras (colunas) em série).

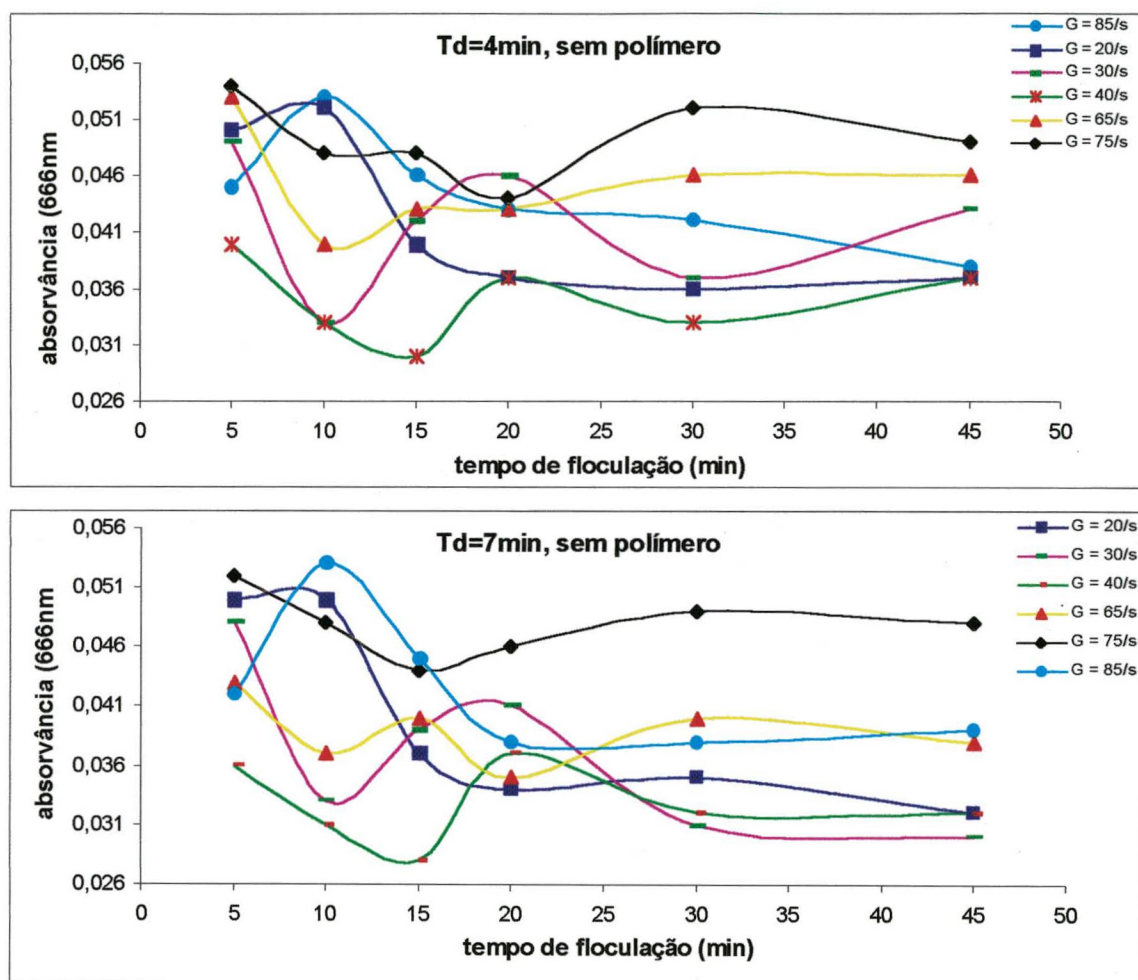


Figura 35 - Redução da cor (absorvância) em função do gradiente e tempo de floculação para tempos de decantação de 4 min ( $v_s=1,75\text{cm/min}$ ) e 7 min ( $v_s=1\text{cm/min}$ ), sem polímero

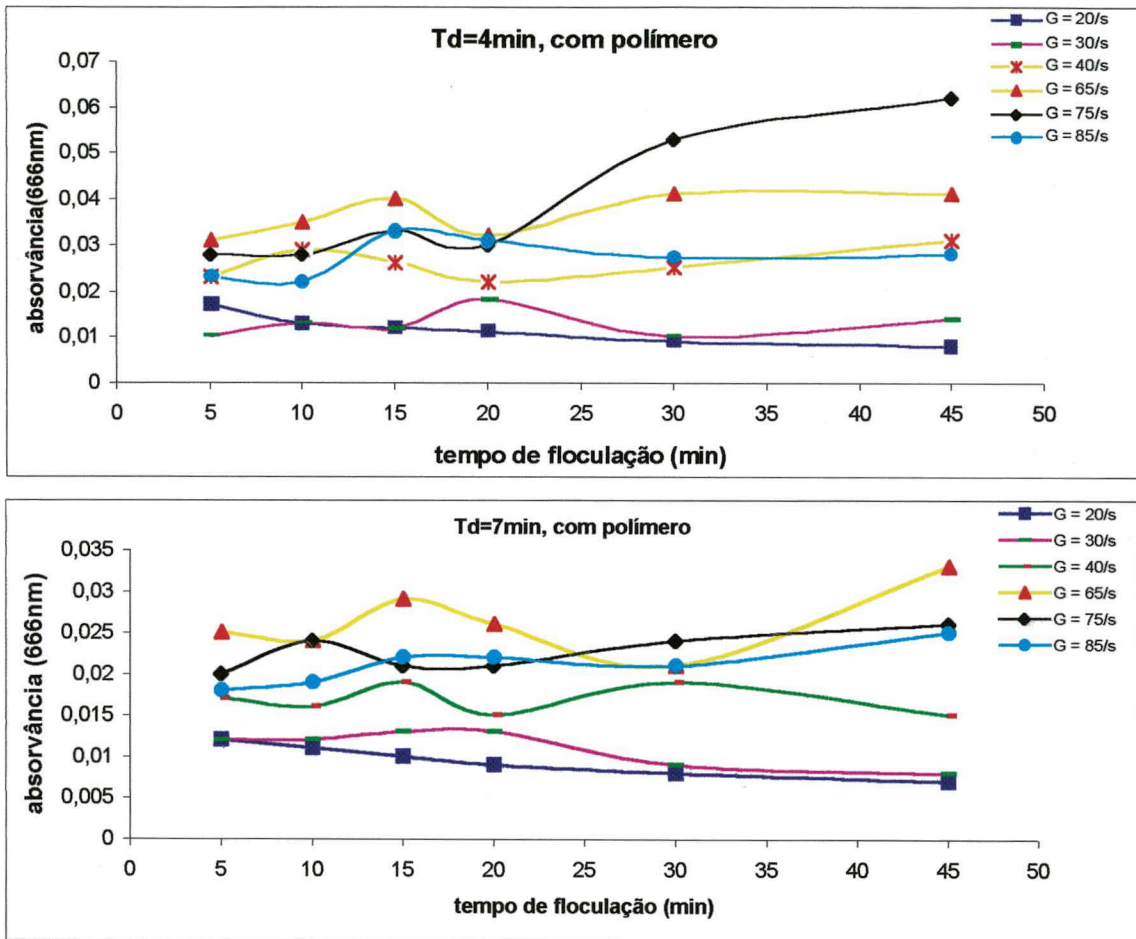


Figura 36 - Redução da cor (absorvância) em função do gradiente e tempo de flocculação para tempos de decantação de 4 min ( $vs=1,75$  cm/min) e de 7 min ( $vs=1$  cm/min), com polímero

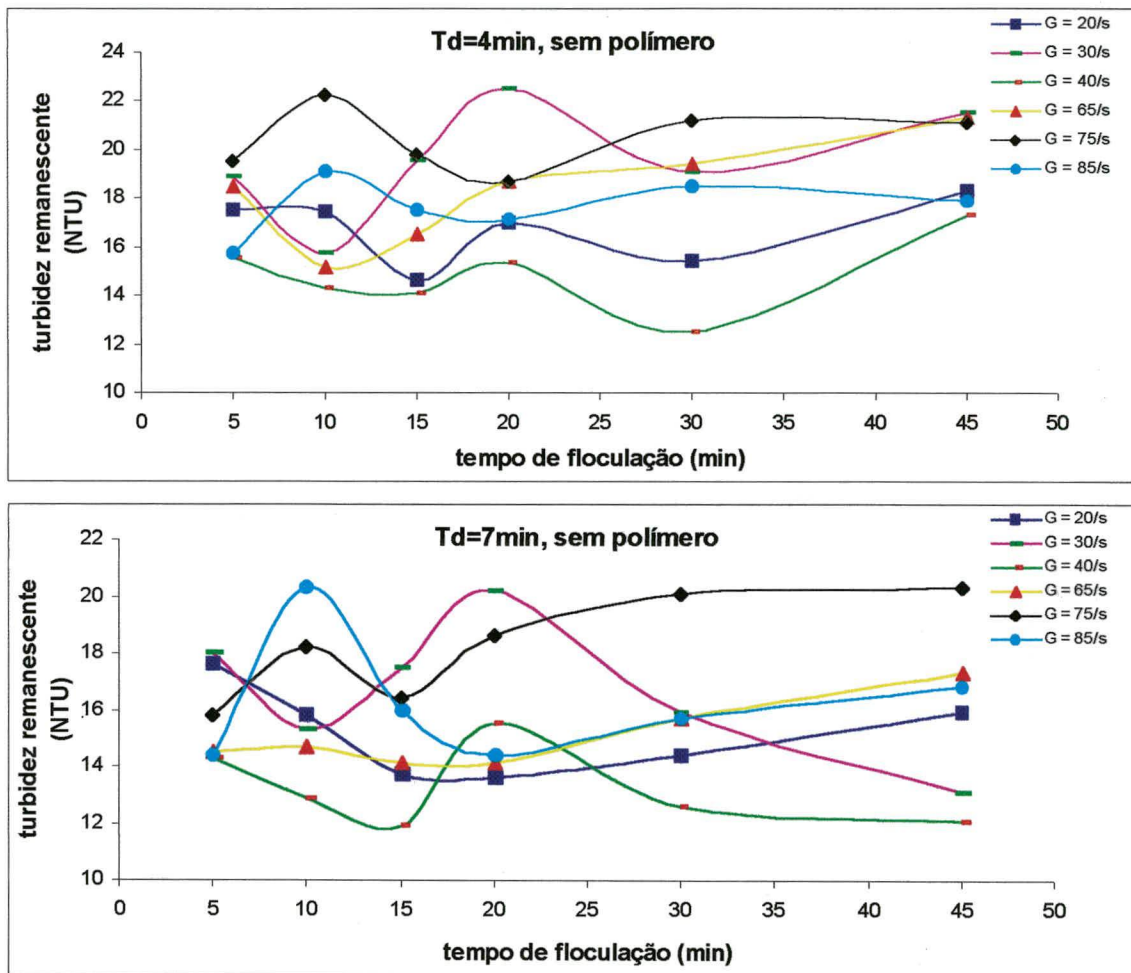


Figura 37 - Redução da turbidez em função do gradiente e tempo de flocação para tempos de decantação de 4 min ( $v_s=1,75\text{cm/min}$ ) e 7 min ( $v_s=1\text{ cm/min}$ ), sem polímero

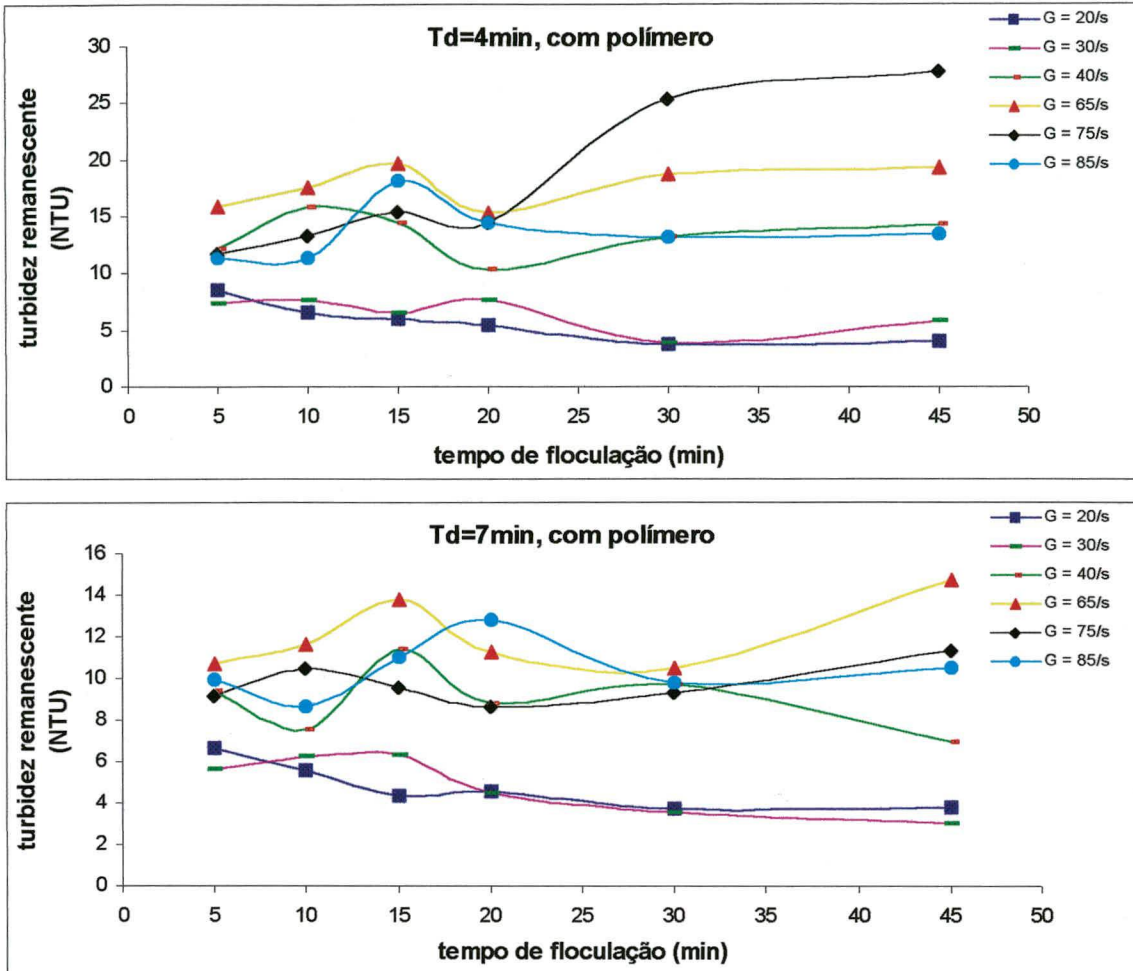


Figura 38 - Redução da turbidez em função do gradiente e tempo de flocculação para tempos de decantação de 4 min ( $v_s=1,75\text{cm/min}$ ) e 7 min ( $v_s=1\text{cm/min}$ ), com polímero

Destes ensaios foram escolhidos os melhores gradientes (melhor remoção de cor e turbidez) que foram  $G = 50$ ,  $G = 40$ ,  $G = 30$  e  $G = 20$ , e com eles foram formados sequências de 3 gradientes (pois o flocculador é formado por 3 colunas) com os quais foram realizados outros ensaios, para determinar qual sequência é a mais efetiva em termos de remoção.

Os ensaios das melhores sequências de gradientes se encontram no Anexo 5, e as figuras 39 e 40 mostram os gráficos com as melhores sequências de gradientes para vários tempos de decantação, mostrando a influência da velocidade de sedimentação na eficiência de remoção, para a determinar a melhor sequência de gradiente e melhor tempo de flocculação.

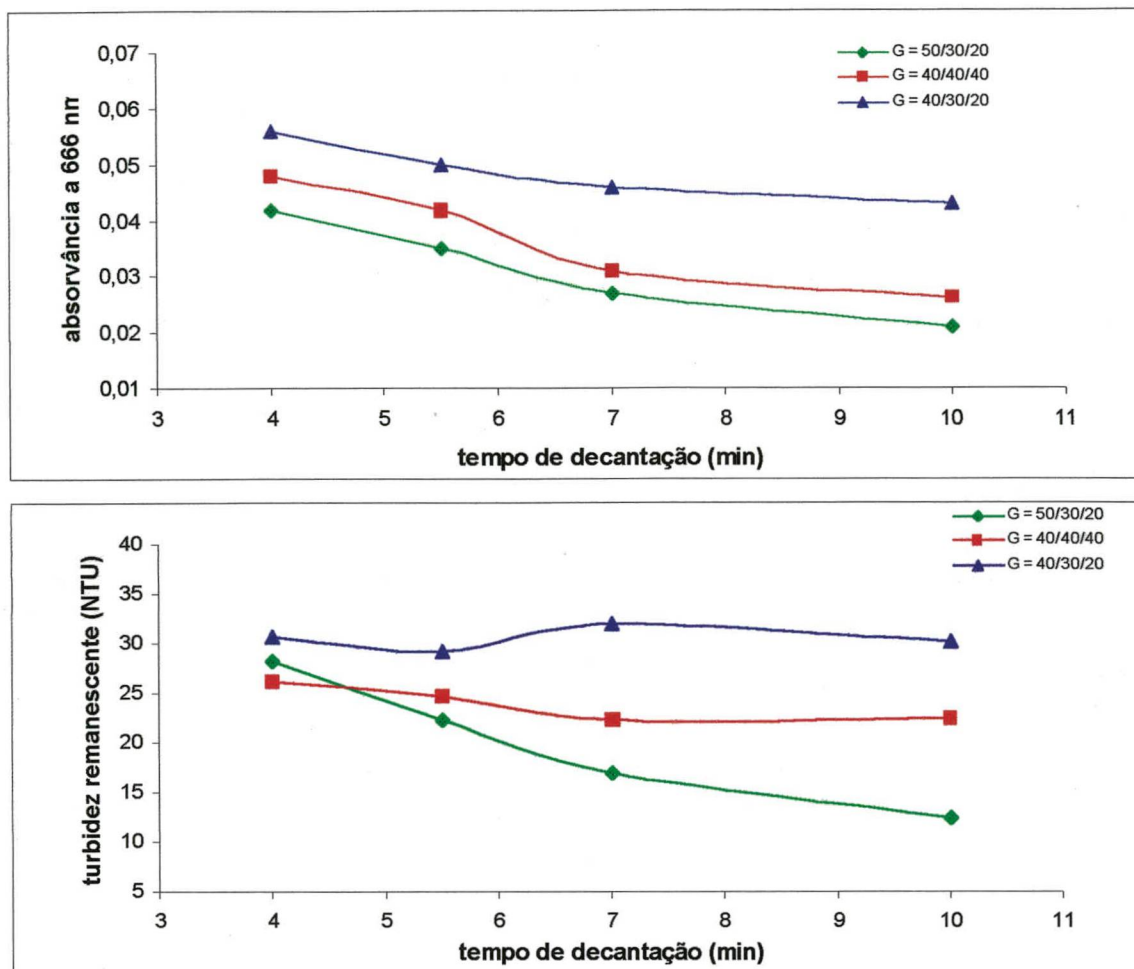


Figura 39 – Redução média de cor (absorvância) e turbidez em função dos gradientes de velocidade e do tempo de decantação, com polímero ( $v_s = 1,75\text{cm/min}$ ,  $1,27\text{cm/min}$ ,  $1\text{cm/min}$  e  $0,7\text{cm/min}$ )



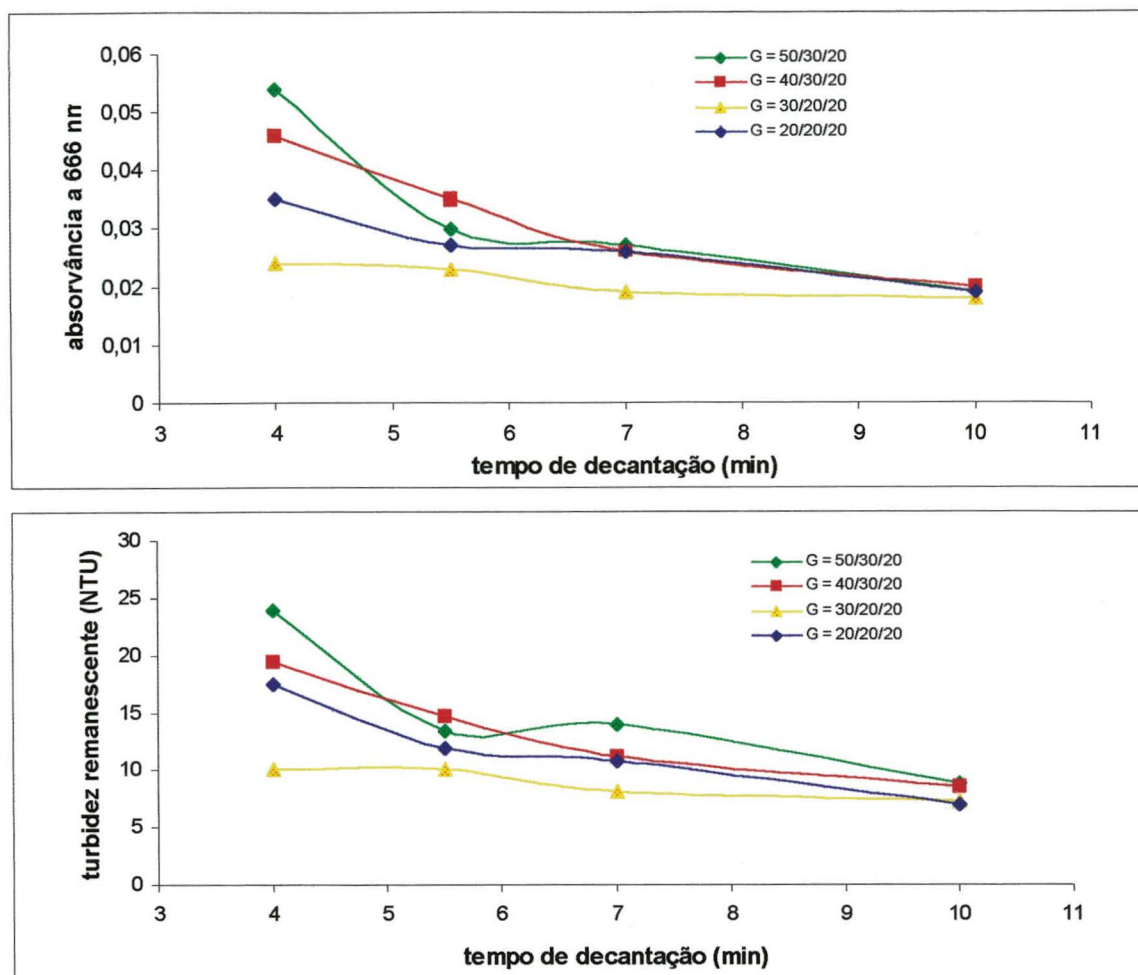


Figura 40 – Redução média de cor (absorvância) e turbidez em função dos gradientes de velocidade e do tempo de decantação, sem polímero ( $v_s = 1,75\text{cm/min}$ ,  $1,27\text{cm/min}$ ,  $1\text{cm/min}$  e  $0,7\text{cm/min}$ )

De acordo com os resultados obtidos, e segundo a metodologia proposta por DI BERNARDO, PÁDUA e LIBÂNIO (1998), obtêm-se o tempo total de floculação de 21 minutos; e sendo o floculador de 3 câmaras (colunas) em série, os melhores gradientes para a primeira, segunda e terceira câmara, foram  $G = 30\text{ s}^{-1}$ ,  $20\text{ s}^{-1}$  e  $20\text{ s}^{-1}$  respectivamente, para o ensaio com polímero; e  $G = 50\text{ s}^{-1}$ ,  $30\text{ s}^{-1}$  e  $20\text{ s}^{-1}$  para o ensaio sem polímero, como pode ser observado nos gráficos anteriores.

### 5.2.1.6 Determinação do Volume de Lodo (série 5)

Com os parâmetros totalmente otimizados, foi realizado um ensaio para cada ponto (com e sem polímero). Após o término da floculação, os jarros ficaram em repouso por 20 minutos (sedimentação). O sobrenadante foi descartado e o volume restante dos 12 jarros (6 com polímero e 6 sem polímero), juntamente com o material sedimentado, foi transferido para Cones Imhof, onde foram feitas leituras do volume de lodo sedimentado durante seis horas. Os ensaios se encontram no Anexo 6.

A figura 41 mostra o gráfico do adensamento do lodo em relação ao tempo de sedimentação, para os ensaios com e sem polímero.

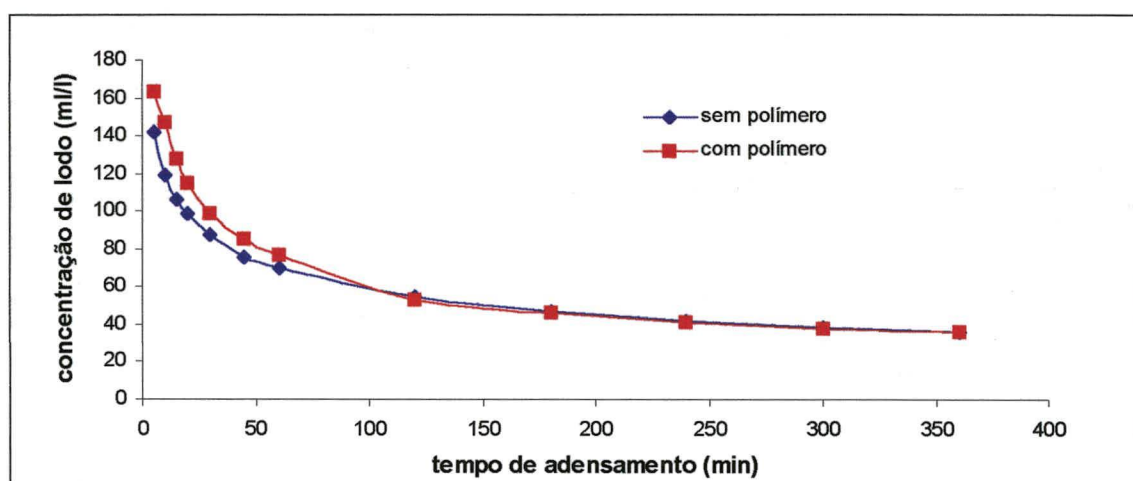
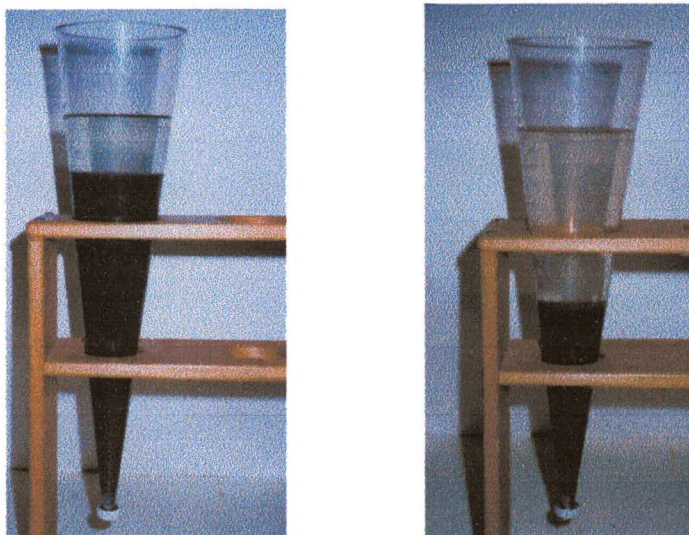


Figura 41 – Concentração de lodo em função do tempo de adensamento, com polímero e sem polímero

Os resultados demonstraram que a redução de lodo com polímero e sem polímero foi praticamente a mesma, ficando praticamente estabilizado a partir de 240 min (4 horas).

A figura 42 mostra a fotografia dos Cones Imhof com o lodo sedimentado, e o efluente já tratado.





*Figura 42 - Cones Imhof no início e no final da sedimentação (6 horas)*

A geração de lodo no processo de coagulação-floculação é função da dosagem de coagulante utilizada no tratamento. Com a otimização da dosagem chegamos a 500 mg/l de sulfato de alumínio, enquanto que na Indústria Têxtil Damyller, a dosagem utilizada é de 800 mg/l.

Do ensaio realizado para a determinação do lodo (Anexo 6), se tem uma idéia final da eficiência de remoção de cor e turbidez para o efluente têxtil em estudo, pois nestes ensaios todos os parâmetros já foram otimizados. A cor (média) do efluente bruto era de 1,08 (666nm) e a turbidez (média) era de 270 NTU.

A eficiência média de remoção de cor do efluente bruto, para um tempo de decantação de 4 minutos foi de 97% (sem polímero) e de 98% (com polímero); para um tempo de decantação de 7 minutos, a eficiência média foi de 98% (sem polímero) e de 98% (com polímero). Já para a turbidez, a eficiência média de remoção para um tempo de decantação de 4 minutos, foi de 93% (sem polímero) e de 97% (com polímero); para um tempo de decantação de 7 minutos, a eficiência média foi de 95% (sem polímero) e de 98% (com polímero).

Como pode ser observado, a adição de polímero não aumentou significativamente a eficiência de remoção de cor, já para a turbidez a eficiência foi um pouco melhor.

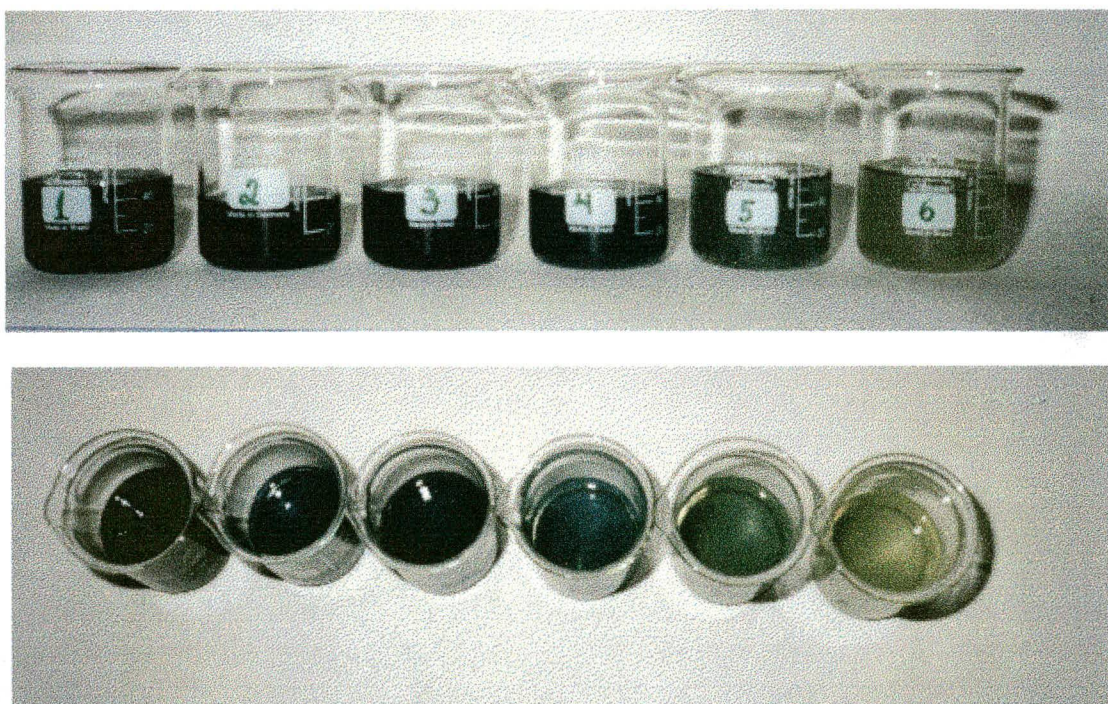
## 5.2.2 Ozonização do Efluente Bruto

### 5.2.2.1 Variação da Concentração de Ozônio

Os corantes são moléculas que geralmente contém ligações insaturadas, sobre as quais o ozônio reage rapidamente.

Segundo NAYME (1997), o consumo de ozônio necessário para alcançar uma determinada porcentagem de descoloração, aumenta quando o efluente contém grande quantidade de carbonatos e produtos auxiliares, pois eles reagem com o ozônio, e prolongam o tempo necessário à descoloração do efluente.

A figura 43 mostra a fotografia de amostras do efluente bruto, ozonizado à concentrações de ozônio de 2,2 - 4,0 - 8,5 - 13,5 - 17,0 - 20,0 mg/l, respectivamente nos frascos 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Estas concentrações foram obtidas num tempo de ozonização de 1 - 2 - 4 - 6,4 - 8,5 - 11 min, respectivamente.



*Figura 43 – Redução da cor do efluente ozonizado à 2,2 - 4,0 - 8,5 - 13,5 - 17,0 - 20,0 mgO<sub>3</sub>/l*

Pode ser observado uma boa remoção de cor a medida que se aumenta a concentração de ozônio.



As figuras 44 e 45 mostram o comportamento da cor e turbidez em relação a várias concentrações de ozônio nos tempos de decantação de 4 e 7 minutos, com e sem polímero. Os ensaios podem ser vistos no Anexo 7.

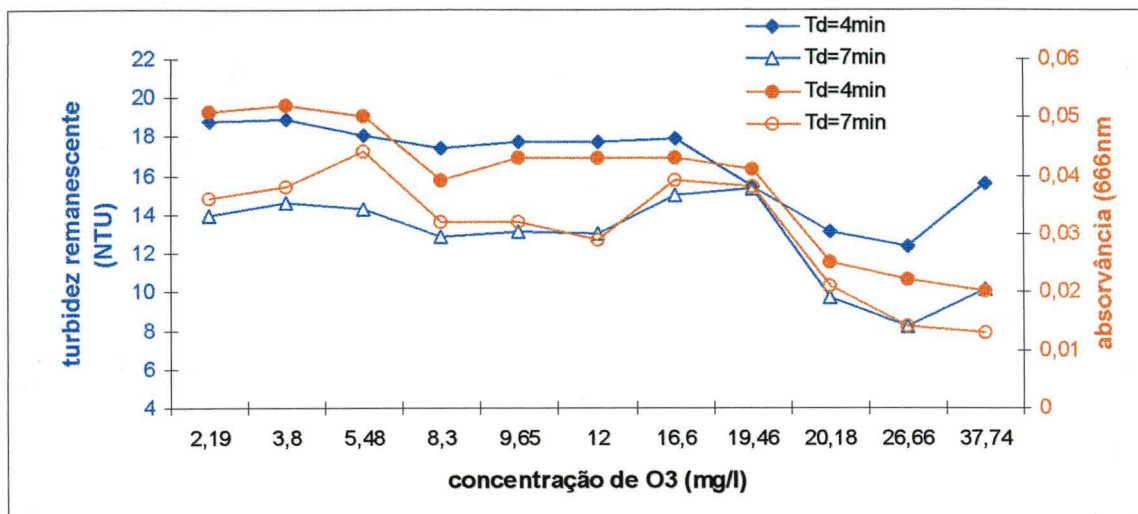


Figura 44 - Redução da turbidez e da absorvância em relação a concentração de ozônio, sem polímero

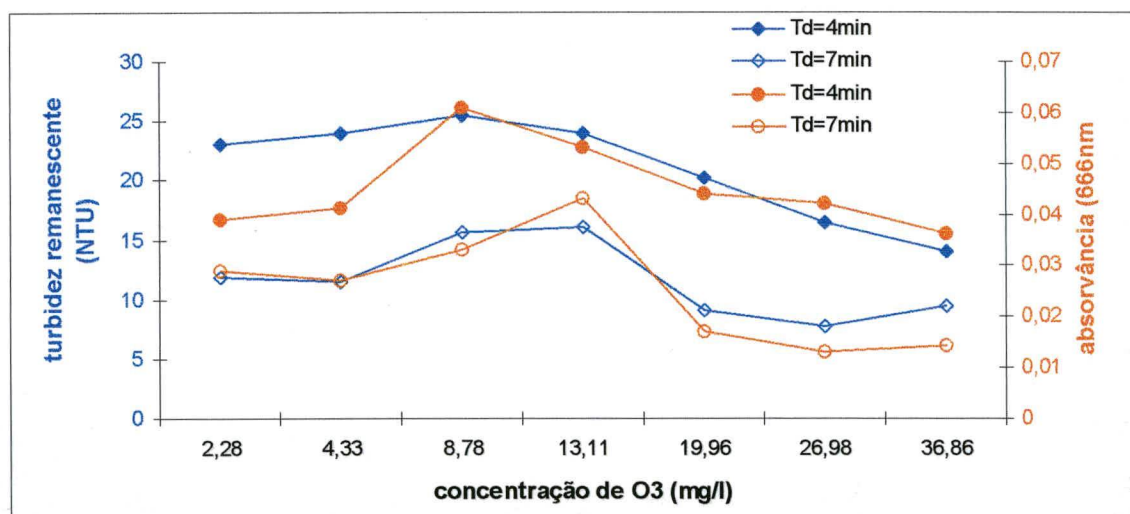


Figura 45 - Redução da turbidez e da absorvância em relação a concentração de ozônio, com polímero

A absorvância do efluente bruto é da ordem de 1,08 (666nm) e com uma aplicação em torno de apenas 8 mgO<sub>3</sub>/l, houve uma redução para 0,03 (97% de eficiência), usando ou não o polímero; a turbidez do efluente bruto é da ordem de 270 NTU, e com a ozonização foi para 13,0 (95% de eficiência), também usando ou não o polímero; resultados esses para um tempo de decantação de 7 min. Estes resultados foram considerados bons, apesar de que com concentrações maiores a eficiência aumentou ainda mais, como pode ser observado.

Para este mesmo tempo de decantação, a eficiência de remoção do efluente sem a ozonização, para a cor e turbidez, ficou em torno de 98%, como visto anteriormente.

Pelos resultados dos ensaios e de acordo os estudos de MELO (1997) e NAYME (1997), adotou-se como parâmetro a concentração de ozônio de 7 mgO<sub>3</sub>/l. Também foram realizados ensaios com a concentração de ozônio de 27 mgO<sub>3</sub>/l apenas para comparação de resultados.

#### 5.2.2.2 Variação da Concentração de Sulfato de Alumínio

Segundo MELO (1997), os resultados da coagulação-floculação, utilizando o sulfato ferroso como coagulante, para um efluente têxtil sintético pré-ozonizado (7,2 mgO<sub>3</sub>/l), demonstrou uma redução na dosagem do coagulante de aproximadamente 20%.

Com as dosagens de ozônio de 7 e 27 mgO<sub>3</sub>/l, foram realizados ensaios de Jar Test, variando agora o coagulante (sulfato de alumínio) para ver o seu comportamento.

As figuras 46 e 47 mostram os gráficos do efluente ozonizado a 7 e 27 mgO<sub>3</sub>/l de ozônio, variando as dosagens de coagulante, para verificar se existe uma diminuição do mesmo, para estas dosagens de ozônio. Os ensaios podem ser vistos no Anexo 8.

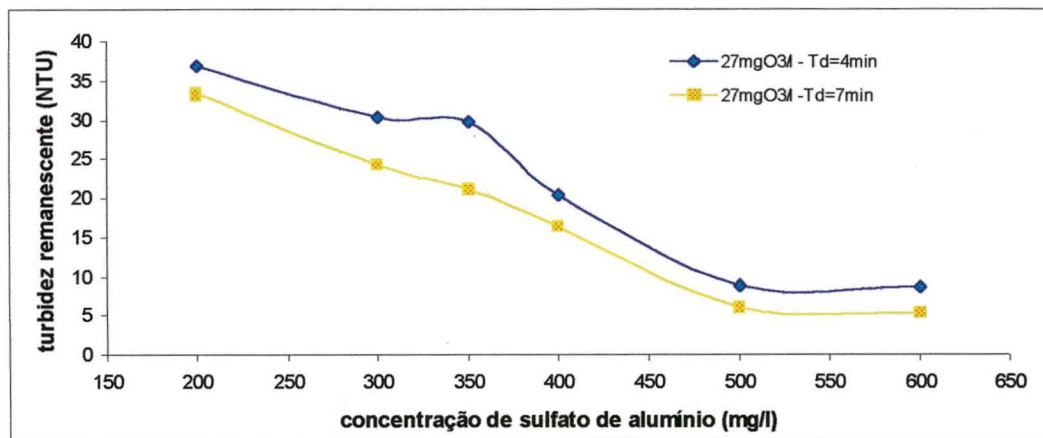
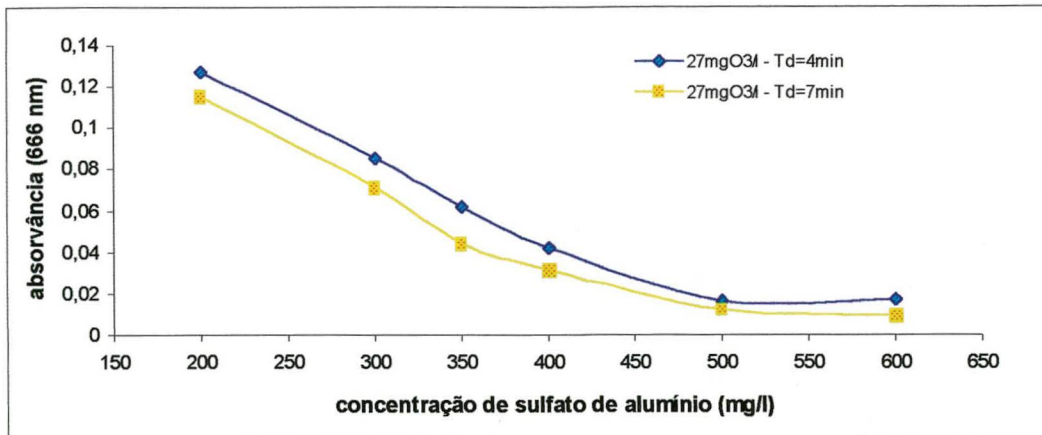
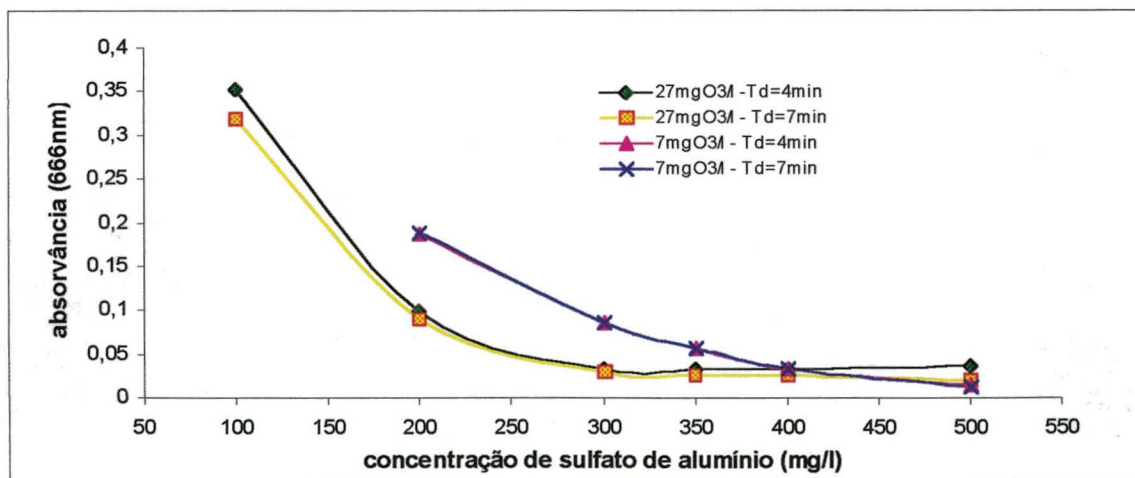


Figura 46 - Redução da absorvância e da turbidez em relação a dosagem de ozônio e de sulfato de alumínio, com polímero



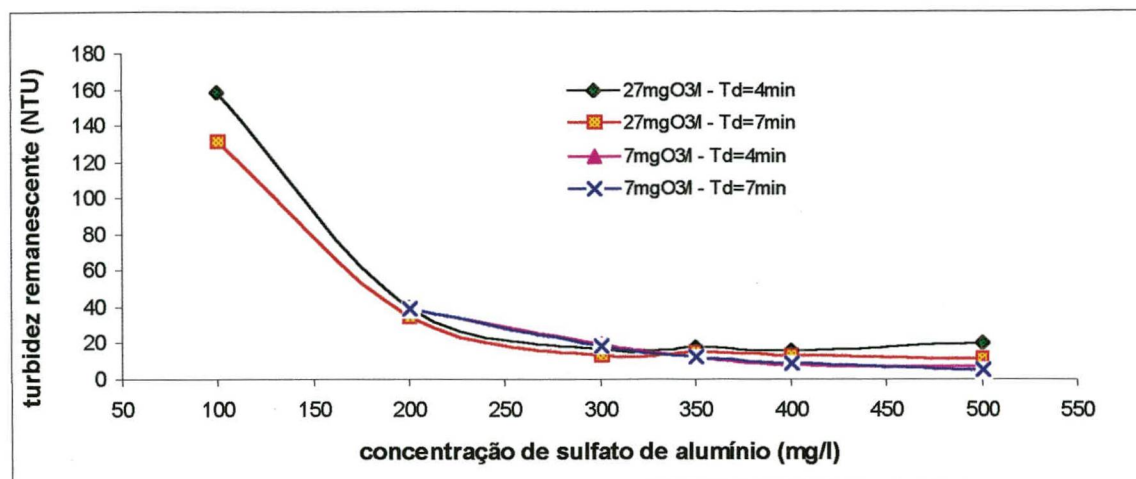


Figura 47 - Redução da absorvância e da turbidez em relação a dosagem de ozônio e de sulfato de alumínio, sem polímero

Como pode ser observado, há uma grande eficiência na remoção de cor e turbidez, mas para este efluente especificamente, e para este tipo de coagulante, a pré-ozonização com 7 mgO<sub>3</sub>/l não promoveu um decréscimo significativo nas dosagens de coagulante. Já para a dosagem de 27 mgO<sub>3</sub>/l, houve uma redução significativa na dosagem de coagulante, mas necessitaria de um estudo econômico, pois a dosagem de ozônio é bastante alta.

O ensaio com 7mgO<sub>3</sub>/l (com polímero) não aparece nos resultados devido a problemas ocorridos durante a sua realização, e por isso foi eliminado.

### 5.3 ESTUDO EM CONTÍNUO: OZONIZAÇÃO E PILOTO DE FLOCULAÇÃO (Etapa 2)

#### 5.3.1 Ozonização

De acordo com as melhores dosagens de ozônio estipuladas na Etapa 1, o efluente bruto foi ozonizado em contínuo. Para a concentração de 7 mgO<sub>3</sub>/l foi utilizado o sistema de ozonização com misturador estático (Q<sub>ef</sub> = 250 l/h), e para a concentração de 27 mgO<sub>3</sub>/l foi utilizado o sistema de ozonização em coluna de contato (Q<sub>ef</sub> = 63 l/h), descritos nos itens 4.5.1 e 4.5.2 respectivamente. O efluente ozonizado foi armazenado nos reservatórios, que posteriormente alimentava o piloto de floculação.

A ozonização no tratamento de efluentes têxteis acontece em dois passos. No primeiro, a ozonização é empregada principalmente para quebrar as grandes moléculas de corantes, e no segundo, acontece então a descoloração. (LIN e LIN, 1993).



### 5.3.2 Piloto de Floculação – Condições Hidráulicas

Os ensaios foram realizados em um piloto de floculação com meio granular expandido, constituído de 3 colunas em série, como descrito no ítem 4.2.

Ensaio hidráulicos para visualizar o comportamento do piloto quando submetido a diferentes velocidades, foram realizados em trabalho anterior por CUBAS (1999), onde foi observado parâmetros como perda de carga e expansão do meio granular, com diferentes tipos de água.

Observou-se também que a velocidade é diretamente proporcional à expansão, sendo que a velocidade mínima de fluidização ( $v_{mf}$ ) do meio granular foi de 72,04 cm/min para a primeira coluna, 61,42 cm/min para a segunda coluna e 52,96 cm/min para a terceira coluna. Esta velocidade diminuía, com o aumento do diâmetro das colunas.

Os valores dos gradientes de velocidade decresceram de uma coluna a outra, em função do aumento do diâmetro das mesmas, aumentando desta forma o tempo de detenção, evitando com isso que os flocos se quebrem.

A medida que a velocidade aumenta, o gradiente de velocidade  $G_e$  tende ao valor máximo, com tendência à estabilidade. O valor desse gradiente de velocidade, na região de  $G_e$  máximo, ficou em torno de  $37,74 \text{ s}^{-1}$ .

A tabela do Anexo 9 apresenta os gradientes de velocidade, expansão, porosidade e perda de carga em relação à velocidade de aproximação medidas no piloto para cada coluna.

Comparando os gradientes desta tabela com os gradientes otimizados na Etapa 1 e, conhecendo a limitação do piloto em relação a sua altura (utilizando vazões acima de 250 l/h, o meio granular passava de uma coluna para outra), os gradientes que mais se aproximaram dos otimizados foram:  $G = 39,35 \text{ s}^{-1}$  para a primeira coluna,  $31,03 \text{ s}^{-1}$  para a segunda coluna, e  $29,74 \text{ s}^{-1}$  para a terceira coluna, que representa uma vazão  $Q = 230 \text{ l/h}$  não utilizando o polímero; para os ensaios com polímero,  $G = 32,32 \text{ s}^{-1}$  para a primeira coluna,  $28,44 \text{ s}^{-1}$  para a segunda coluna, e  $23,75 \text{ s}^{-1}$  para a terceira coluna, que representa uma vazão  $Q = 134 \text{ l/h}$ .

A vazão de 230 l/h também foi a utilizada nos experimentos realizados por CUBAS (1999).

### 5.3.2.1 Efluente Bruto (sem ozônio)

Nestes ensaios, o efluente bruto foi floculado no reator em contínuo, trabalhando-se com vazão de 230 l/h (sem polímero), e com vazão de 170 l/h (com polímero); não foi possível trabalhar com a vazão de 134 l/h, pois houve problemas de colmatação do meio granular. Para caracterizar o desempenho da floculação, foram medidos os parâmetros cor e turbidez após os tempos de decantação de 4 e 7 minutos. Os ensaios poderão ser vistos no Anexo 10.

A figura 48 mostra o decaimento da cor e turbidez (média dos ensaios) em relação ao tempo de funcionamento do piloto. A turbidez média do efluente bruto era de 270 NTU e a absorvância média do efluente bruto era de 1,08 (666nm).

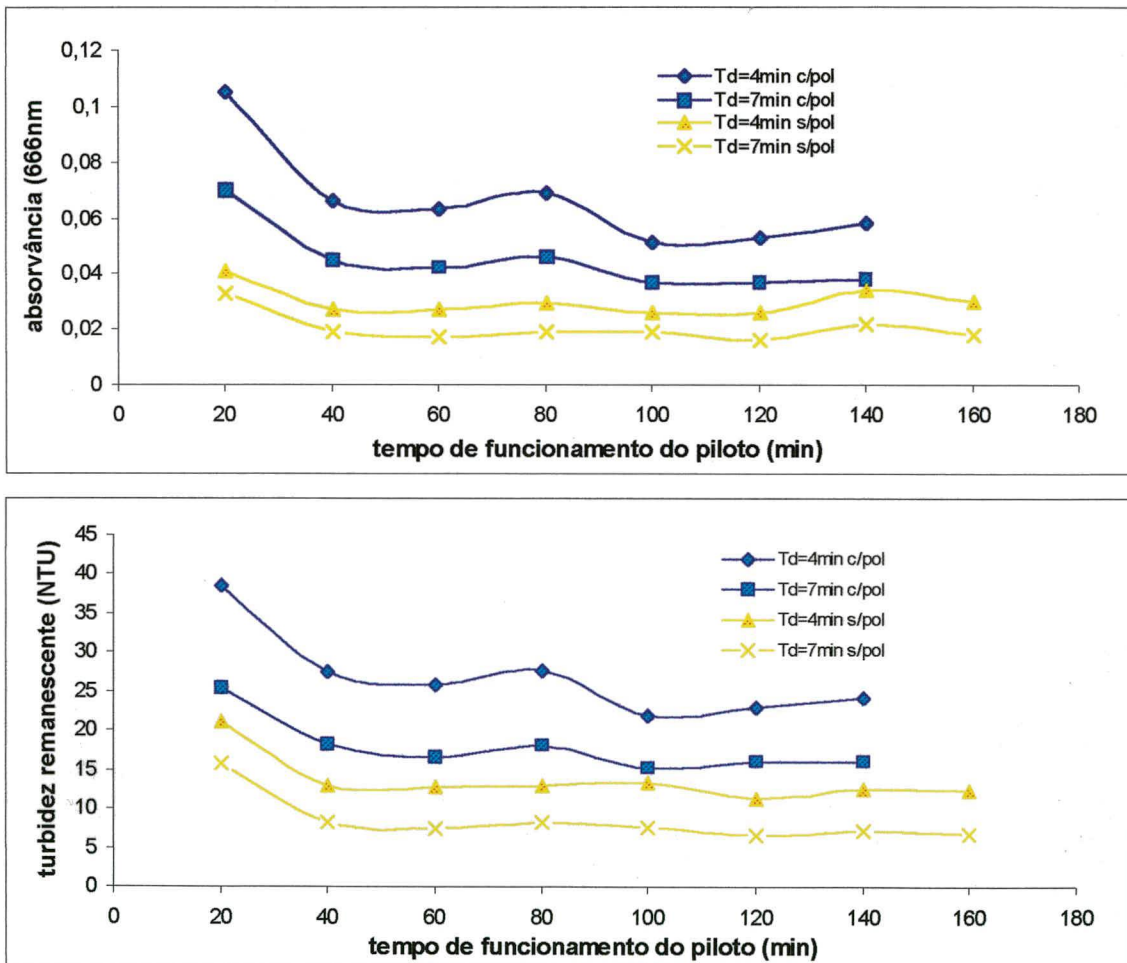


Figura 48 - Redução da absorvância e da turbidez em relação ao tempo de funcionamento do piloto, com polímero e sem polímero

Nestas figuras, observa-se que a remoção da cor e turbidez nos primeiros 40 minutos decaiu, e em seguida permaneceu praticamente constante em todo o tempo de operação do sistema de tratamento.

Para o tempo de decantação de 4 minutos, obteve-se eficiência de remoção de cor na ordem de 97% (sem polímero) e de 94% (com polímero); já para a turbidez, a eficiência de remoção foi de 95% (sem polímero) e de 90% (com polímero). Para o tempo de decantação de 7 minutos, obteve-se eficiência de remoção de cor na ordem de 98% (sem polímero) e de 96% (com polímero); já para a turbidez, a eficiência de remoção foi de 97% (sem polímero) e de 93% (com polímero). O efluente bruto apresentava absorvância em torno de 1,08 e turbidez em torno de 270 NTU.

Os resultados mostram que o uso do polímero não causou uma melhora na eficiência de remoção de cor e turbidez, para este efluente.

É importante salientar que o tempo de floculação no piloto é de 3 minutos, enquanto que normalmente o tempo de floculação em estações de tratamento convencionais fica em torno de 20 a 40 minutos.

### 5.3.2.2 Efluente Ozonizado

#### 5.3.2.2.1 Concentração de Aplicação: 7 mgO<sub>3</sub>/l

Nestes ensaios, o efluente ozonizado foi floculado nas mesmas condições descritas para o efluente bruto. Os resultados dos ensaios poderão ser vistos no Anexo 11.

A figura 49 mostra o decaimento da cor e turbidez (média dos ensaios) num tempo de decantação de 4 e 7 minutos em relação ao tempo de funcionamento do piloto, com e sem polímero.



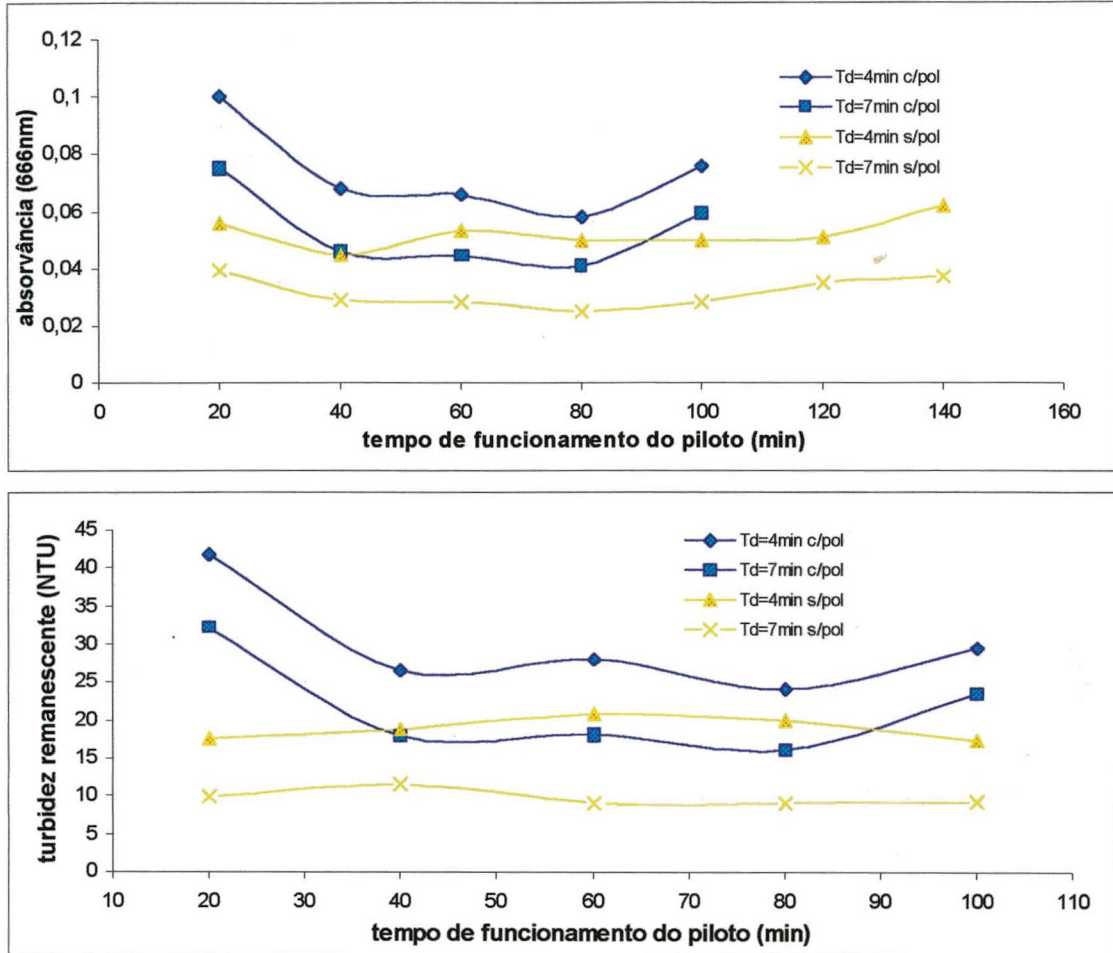


Figura 49 - Redução da absorvância e da turbidez do efluente pré-ozonizado ( $7\text{mgO}_3/\text{l}$ ), com polímero e sem polímero

Para o tempo de decantação de 4 minutos, obteve-se eficiência de remoção de cor na ordem de 95% (sem polímero) e de 93% (com polímero); já para a turbidez, a eficiência de remoção foi de 92% (sem polímero) e de 88% (com polímero). Para o tempo de decantação de 7 minutos, obteve-se eficiência de remoção de cor na ordem de 97% (sem polímero) e de 95% (com polímero); já para a turbidez, a eficiência de remoção foi de 96% (sem polímero) e de 91% (com polímero). Estas eficiências são para o tratamento como um todo, ou seja, do efluente bruto ao efluente decantado.

Pode ser observado que o uso do polímero para o efluente ozonizado também não aumentou a eficiência de remoção de cor e turbidez. E também pode-se observar que ozonizando a  $7\text{mg/l}$ , a eficiência de remoção também não melhorou comparando com os resultados do efluente não ozonizado.

### 5.3.2.2.2 Concentração de Aplicação: 27 mgO<sub>3</sub>/l

Nestes ensaios, o efluente ozonizado também foi floculado nas mesmas condições descritas para o efluente bruto. Os resultados dos ensaios poderão ser vistos no Anexo 12.

A figura 50 mostra o decaimento da cor e turbidez num tempo de decantação de 4 e 7 minutos em relação ao tempo de funcionamento do piloto, com e sem polímero.

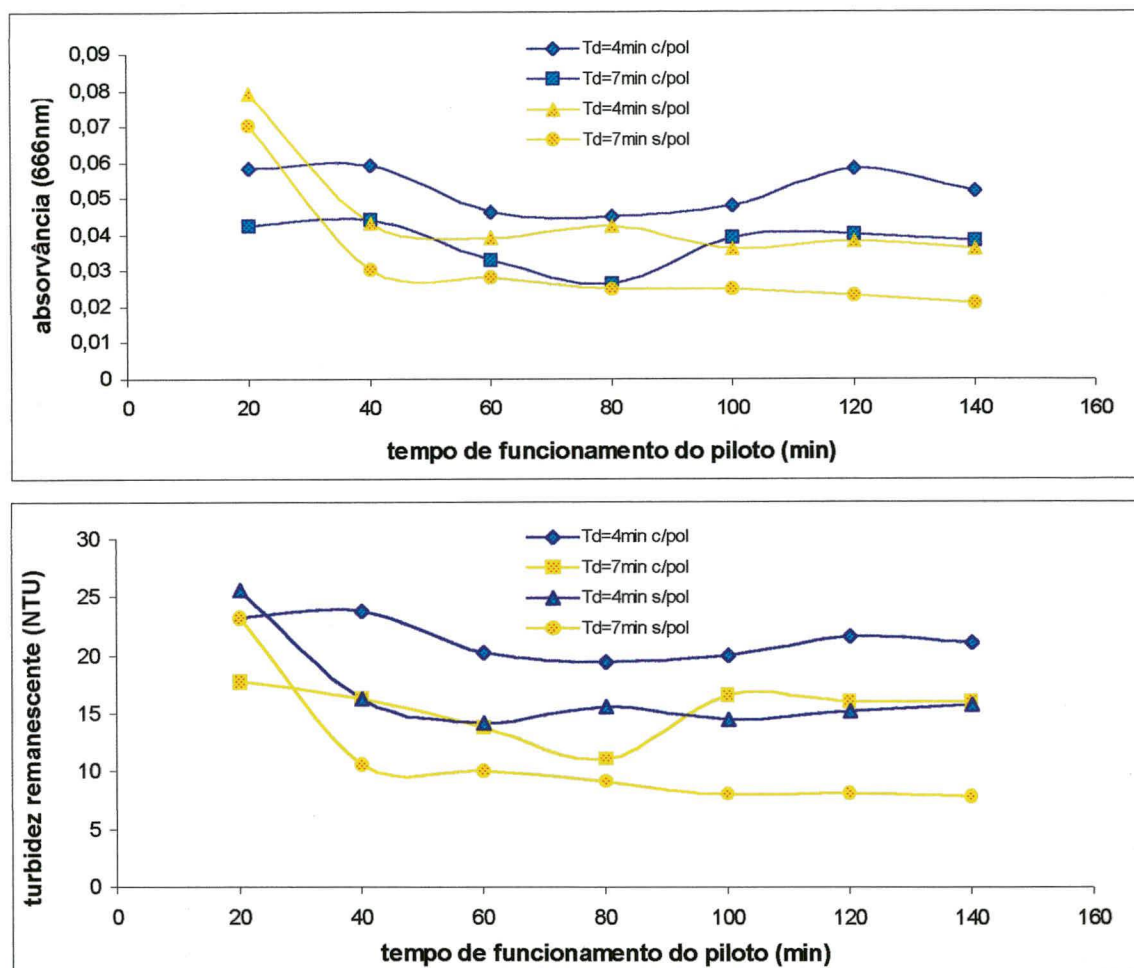


Figura 50 - Redução da absorvância e da turbidez do efluente pré-ozonizado (27mgO<sub>3</sub>/l), com polímero e sem polímero

Para o tempo de decantação de 4 minutos, obteve-se eficiência de remoção de cor na ordem de 96% (sem polímero) e de 95% (com polímero); já para a turbidez, a eficiência de remoção foi de 94% (sem polímero) e de 92% (com polímero). Para o tempo de decantação de 7 minutos, obteve-se eficiência de remoção de cor na ordem de 96% (sem polímero) e de 96% (com polímero); já para a turbidez, a eficiência de remoção foi de 95% (sem polímero) e de 94% (com polímero). Estas eficiências são em relação ao efluente bruto que apresenta uma turbidez média de 270 NTU, e uma absorvância média de 1,08 (666nm).

Como pode ser observado, a eficiência de remoção ozonizando a 7 mgO<sub>3</sub>/l ou a 27 mgO<sub>3</sub>/l, é praticamente a mesma, mostrando que com uma pequena dose de ozônio seguida de coagulação-floculação, pode-se ter uma boa remoção de cor e turbidez. Uma pequena dose de ozônio não causa uma oxidação completa, mas uma oxidação parcial, facilitando o tratamento posterior (químico ou biológico).

#### 5.3.2.2.3 Concentração de Aplicação: 7 mg/l de O<sub>3</sub> (efluente tratado biologicamente)

O efluente têxtil, ozonizado e tratado em um reator biológico (leito fluidizado, trifásico, aeróbico), foi floculado no reator em contínuo, trabalhando-se com vazão de 230 l/h (sem polímero), e com vazão de 134 l/h (com polímero). No ensaio com polímero se utilizou esta vazão pois foi o primeiro efluente testado no floculador, e logo se percebeu a colmatação do meio, por isso os outros ensaios foram realizados com uma vazão maior. Foram medidos os parâmetros cor e turbidez, após os tempos de decantação de 4 e 7 minutos. Os ensaios poderão ser vistos no Anexo 13.

A figura 51 mostra o decaimento da cor e turbidez num tempo de decantação de 4 e 7 minutos, em relação ao tempo de funcionamento do piloto, com e sem polímero.



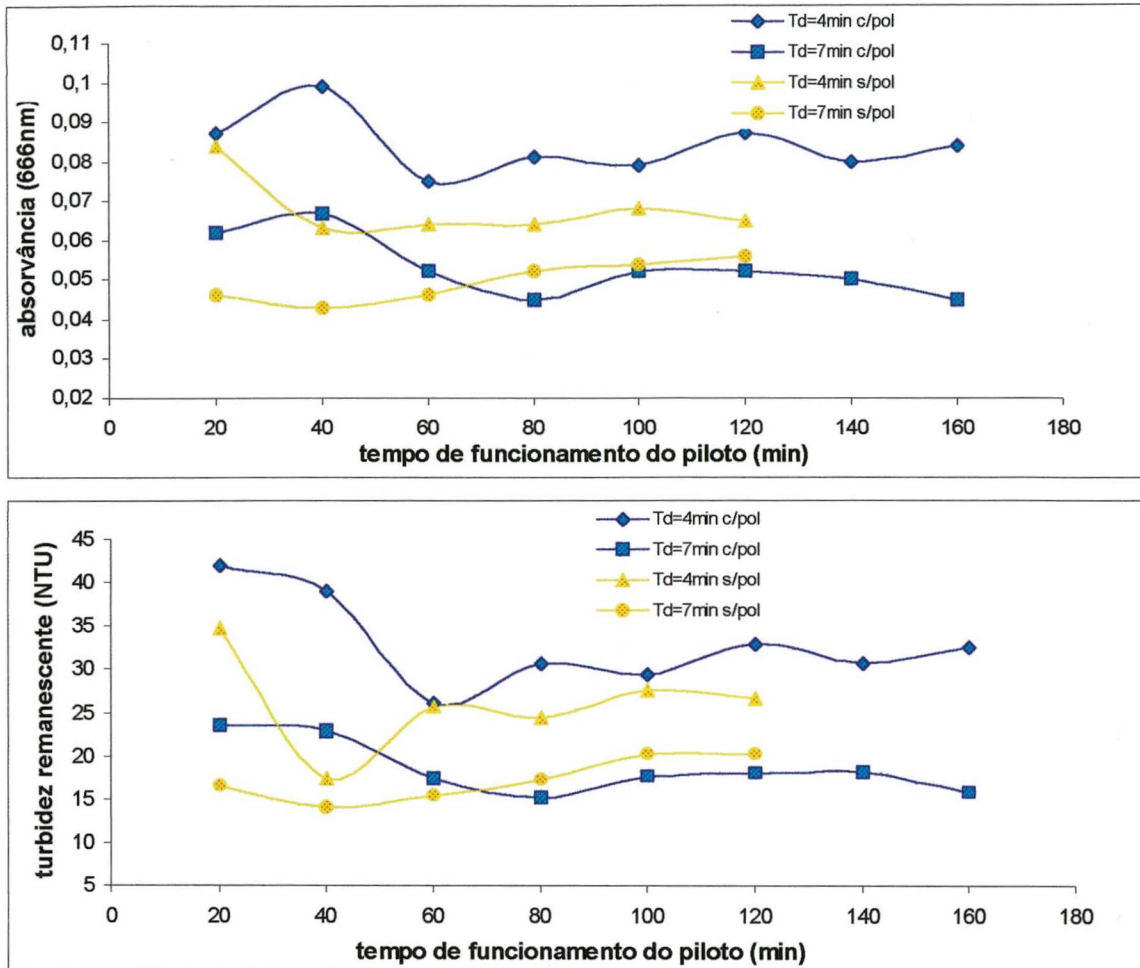


Figura 51 - Redução da absorvância e da turbidez do efluente pré-ozonizado ( $7\text{mgO}_3/\text{l}$ ) tratado biologicamente, com polímero e sem polímero

Para o tempo de decantação de 4 minutos, obteve-se eficiência de remoção de cor na ordem de 92% (sem polímero) e de 90% (com polímero); já para a turbidez, a eficiência de remoção foi de 90% (sem polímero) e de 88% (com polímero). Para o tempo de decantação de 7 minutos, obteve-se eficiência de remoção de cor na ordem de 95% (sem polímero) e de 94% (com polímero); já para a turbidez, a eficiência de remoção foi de 94% (sem polímero) e de 93% (com polímero). Esta eficiência é do tratamento como um todo, ou seja, do efluente bruto (turbidez média de 270, e a absorvância média de 1,08) ao efluente decantado.

Como pode ser observado, o uso do polímero não melhorou os resultados, e também pode-se notar que não houve diferença significativa nos resultados em relação aos ensaios somente com tratamento físico-químico.

### 5.3.3 Redução de cor e turbidez

A absorvância (cor) e a turbidez do efluente bruto apresentaram variações devido ser este um efluente industrial, havendo portanto uma variação em função do processo produtivo diário. O valor médio da cor e turbidez foi de 1,08 e 270, respectivamente.

As figuras 52 e 53 mostram os resultados de redução de cor e turbidez para todos os ensaios, visto em separado anteriormente. Através da união deles pode-se observar melhor qual o tipo de tratamento que foi mais efetivo para a remoção de cor e turbidez para este efluente têxtil.

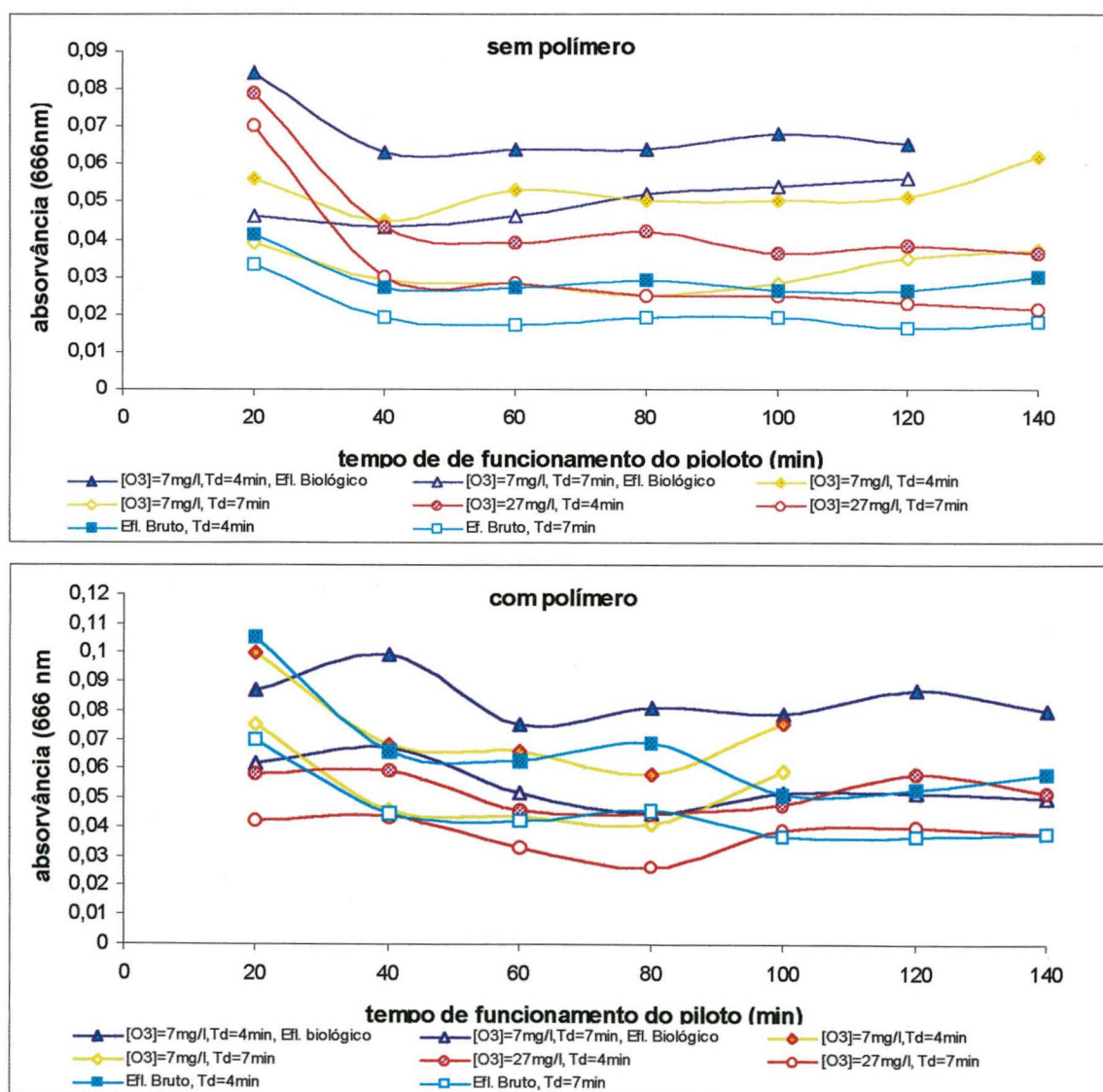


Figura 52 – Resultados da absorvância entre os ensaios, sem polímero e com polímero

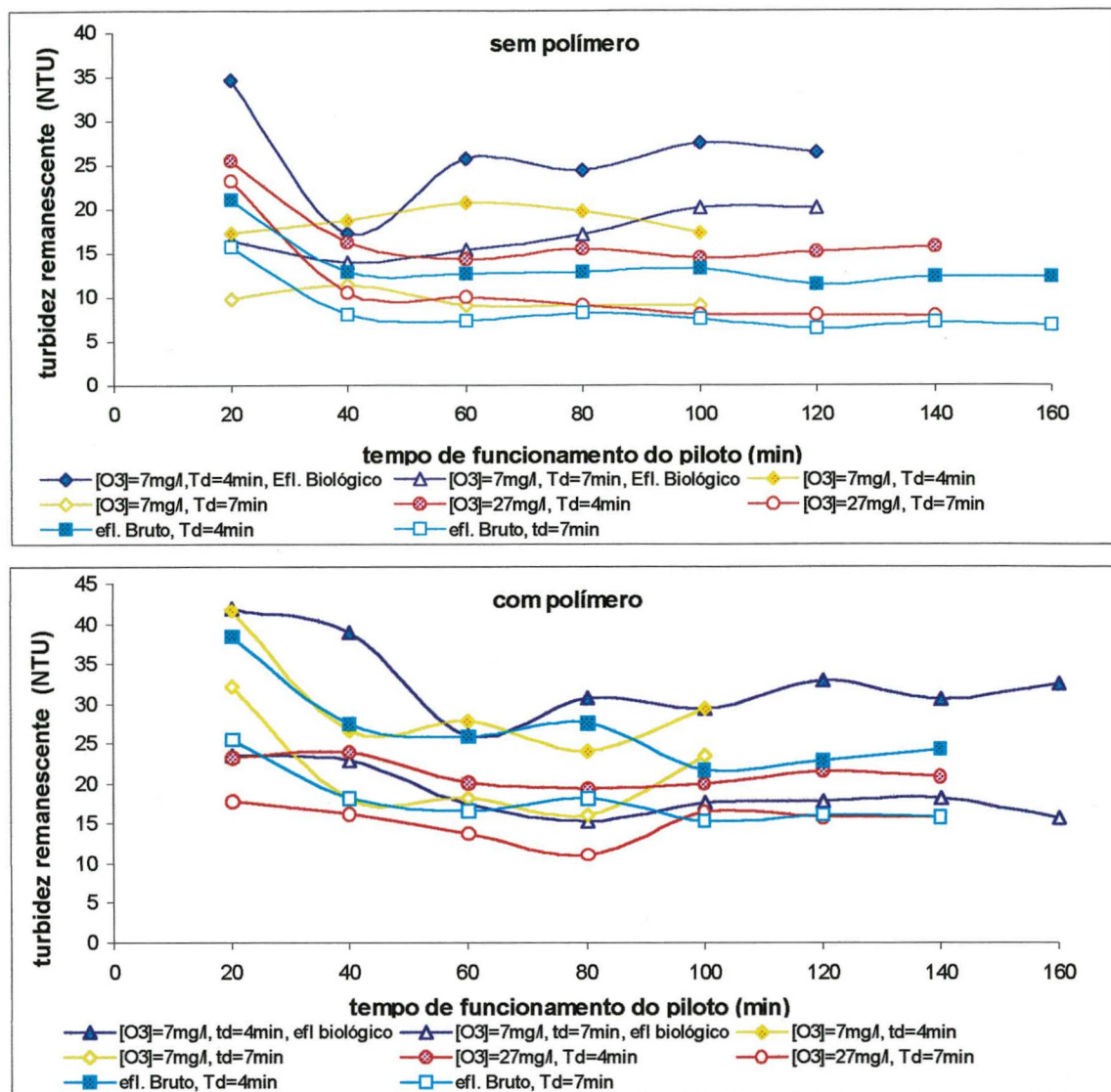


Figura 53 – Resultados da turbidez entre os ensaios, sem polímero e com polímero

A figura 54 mostra a redução média de cor e turbidez na entrada e saída do piloto de floculação dos ensaios realizados.



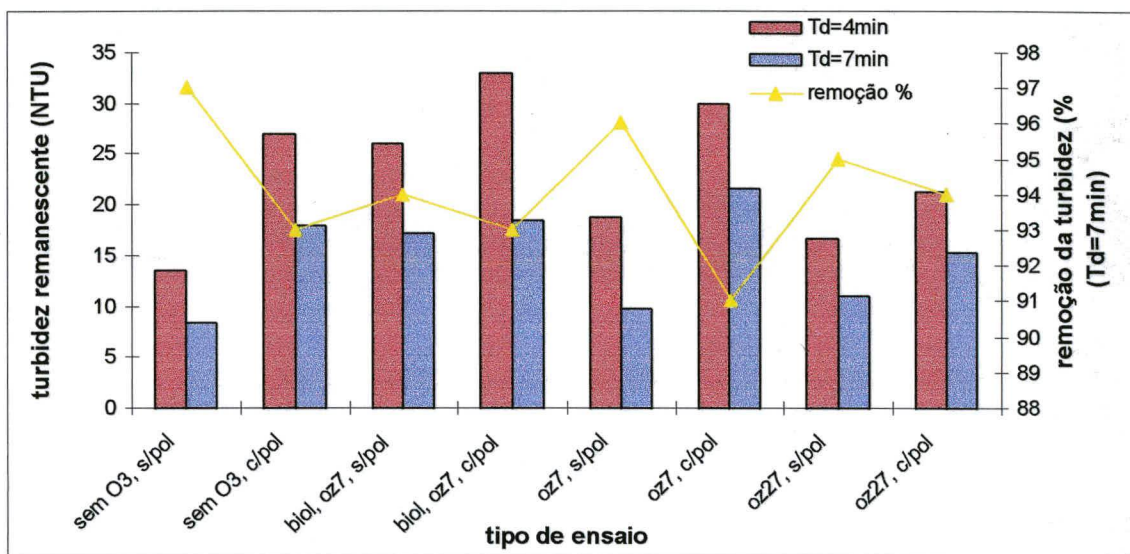
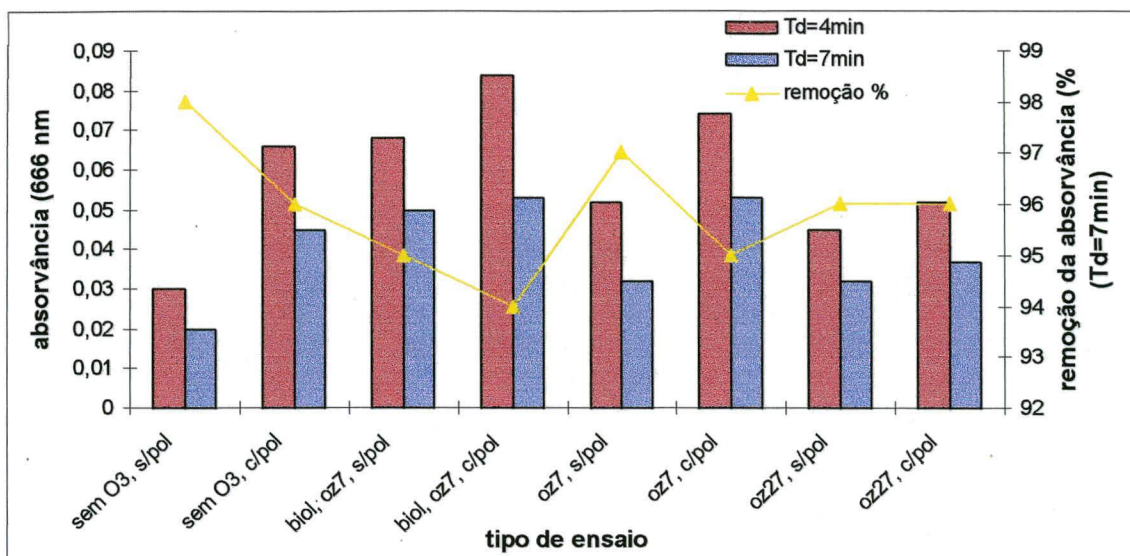


Figura 54 – Cor (absorvância) e turbidez média de entrada e saída do piloto de floculação, e eficiência de remoção

Para os ensaios em contínuo pode-se notar que, para este efluente o melhor processo de tratamento é o físico-químico (coagulação-floculação), sem o uso do polímero adotado e sem a pré-ozonização. Para um tempo de decantação de 7 min e um tempo de detenção no floculador de apenas 3 min, a eficiência de remoção de cor e turbidez foi de 98% e 97% respectivamente. Estes resultados mostram o bom desempenho do piloto de floculação em estudo. Evidentemente que os resultados poderão ser ainda melhores na aplicação de outro polieletrólito.

Segundo KAWAMURA (1996), a pré-ozonização nem sempre melhora a floculação, e ainda segundo SIDDIQUI, et al. (1997), a pré-ozonização pode inibir a efetividade da coagulação.

Para LIN e LIN (1993), a turbidez aumenta com o tempo de ozonização, dificultando a redução de cor. A explicação para isto é o aumento significativo da quantidade de sólidos suspensos durante a ozonização.

### 5.3.4 Redução de DQO, COD e Sólidos

Objetivando avaliar a eficiência do tratamento, análises de DQO (total e solúvel), COD, e Sólidos (totais e suspensos) foram realizados para os efluentes bruto, ozonizado e decantado.

#### 5.3.4.1 DQO (Demanda Química de Oxigênio)

As análises de DQO foram realizadas com o efluente bruto e com os efluentes decantados do reator em contínuo (com e sem polímero, e ozonizado), num tempo de decantação de 7 minutos, para avaliar a eficiência do tratamento.

A figura 55 mostra os valores médios da DQO total e solúvel de entrada e saída do piloto de floculação, com e sem polímero.

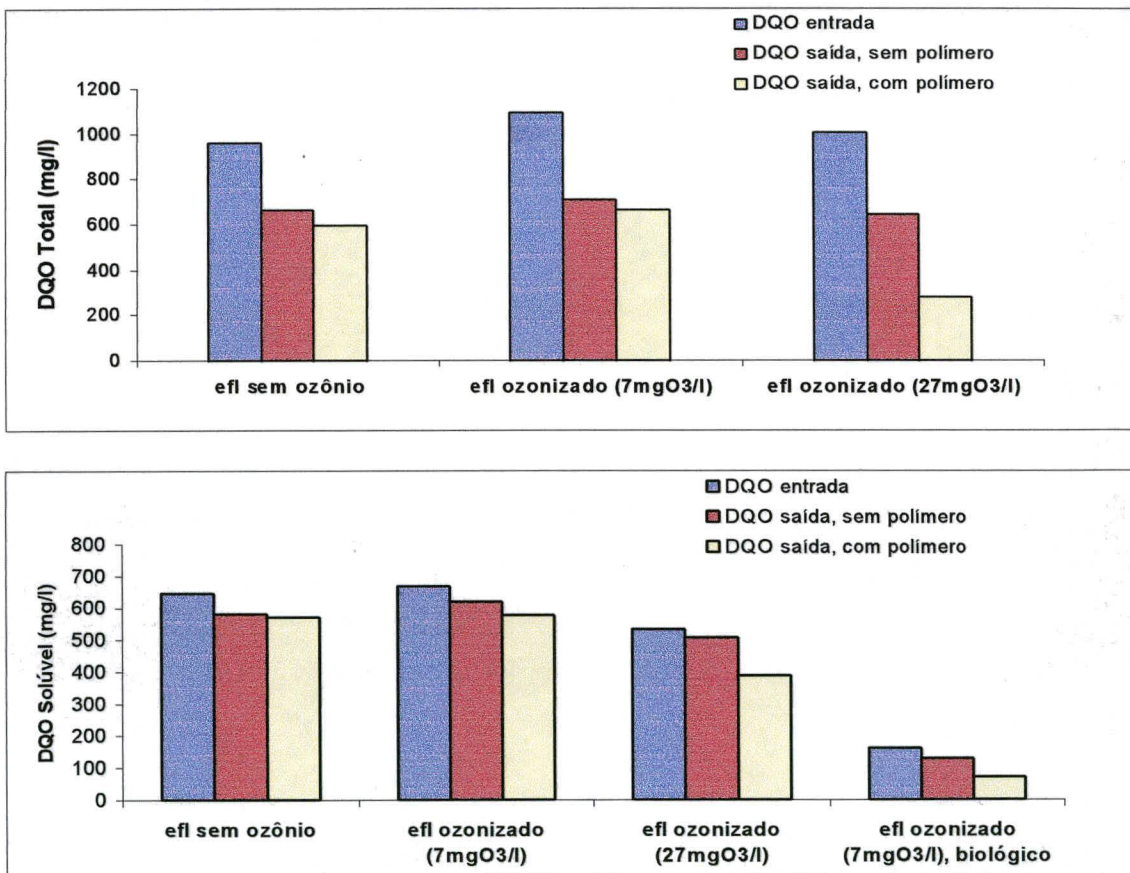


Figura 55 - DQO (total e solúvel) de entrada e saída do piloto de floculação



Como pode ser observado, para a DQO total, a eficiência de remoção do efluente bruto (sem a ozonização) foi de 31% sem polímero e de 38% com polímero; para o efluente ozonizado 7 mgO<sub>3</sub>/l, a eficiência foi de 26% sem polímero e de 31% com polímero; para o efluente ozonizado 27 mgO<sub>3</sub>/l, a eficiência foi de 33% sem polímero e de 71% com polímero.

Para a DQO solúvel, a eficiência do tratamento do efluente bruto (sem a ozonização) foi de 10% sem polímero e de 12% com polímero; para o efluente ozonizado 7 mgO<sub>3</sub>/l, a eficiência foi de 4% sem polímero e de 11% com polímero; para o efluente ozonizado 27 mgO<sub>3</sub>/l, a eficiência foi de 21 % sem polímero e de 40% com polímero; para o efluente biológico, a eficiência foi de 80% sem polímero e de 89% com polímero.

Pode-se observar que a redução da DQO foi pequena durante o mesmo período em que a cor foi retirada. A concentração média de DQO é maior no efluente ozonizado do que no efluente bruto, coincidindo com os resultados desenvolvidos por LIN e LIN (1993). Segundo Rice (1981), citado na fonte anterior, a baixa redução de DQO (0 a 20%) é atribuída ao fato de que as moléculas de corantes (polímeros estruturados) são oxidadas pela ozonização à pequenas moléculas, tais como ácido acético, aldeídos e cetonas, ao invés de dióxido de carbono e água. Estas pequenas moléculas ainda possuem uma considerável quantidade de DQO, e não foram completamente removidas no processo de coagulação. Ainda segundo o mesmo autor, a DQO residual atribuída pelas pequenas moléculas geradas durante a ozonização pode ser facilmente biodegradadas em um processo biológico, como pode ser observado nos resultados.

Segundo NAYME (1997), baixas reduções de DQO são habitualmente observadas na ozonização de efluentes industriais.

GONÇALVES (1996), descreve o resultado de ensaios de coagulação-floculação de efluentes de lavanderias de Colatina, utilizando vários coagulantes, e conclui que a tratabilidade pelo processo físico-químico é limitada no que se refere a redução de DQO.

A pré-ozonização não é efetiva na redução de DQO, mas em conjunto com processos biológico e coagulação química, essa redução se torna bastante efetiva como pode-se observar nos resultados.

### 5.3.4.2 COD (Carbono Orgânico Dissolvido)

As análises de COD foram realizadas com o efluente bruto e com os efluentes decantados (com e sem polímero, e ozonizado) do reator em contínuo, num tempo de decantação de 7 minutos.

A figura 56 mostra os valores médios de COD de entrada e saída do reator, com e sem polímero.

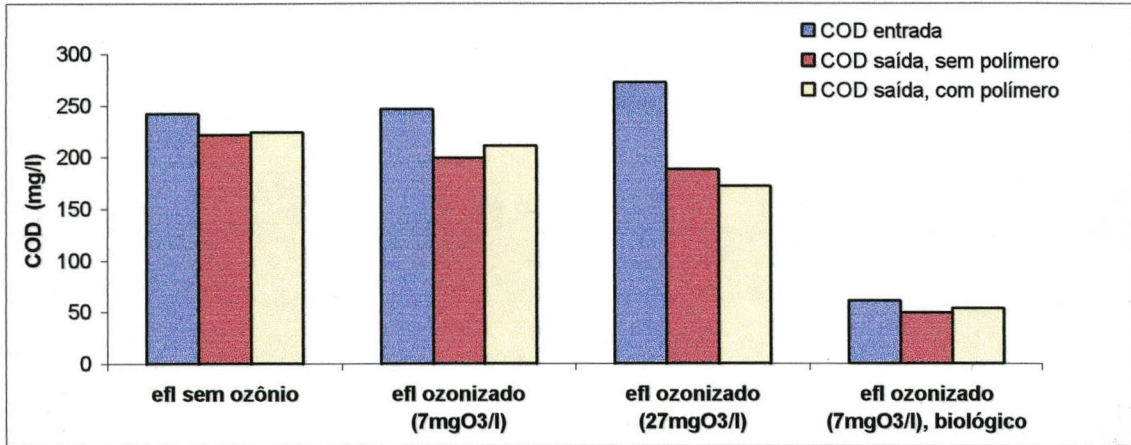


Figura 56 - COD de entrada e saída do piloto de floculação

A eficiência de remoção de COD para o efluente bruto (sem ozônio) foi de 9% sem polímero e de 7% com polímero; para o efluente ozonizado 7 mgO<sub>3</sub>/l a eficiência foi de 18% sem polímero e de 13% com polímero; para o efluente ozonizado 27 mgO<sub>3</sub>/l a eficiência foi de 22% sem polímero e de 29% com polímero, para o efluente biológico, a eficiência foi de 75% sem polímero e de 78% com polímero.

Mesmo o piloto trabalhando em regime contínuo, sempre há acúmulo de impurezas no meio, e estas provavelmente possuem carbono orgânico que se incorporam à massa líquida.

De acordo com KAWAMURA (1996), a pré-ozonização geralmente aumenta os níveis de COT, elevando também os teores de COD assimilável devido a decomposição macromolecular dos compostos orgânicos em compostos de menor peso molecular, os quais são facilmente digeridos pelos microorganismos (processo biológico), como realmente mostra os resultados. Estes subprodutos orgânicos servem como fonte de carbono para as bactérias.

O pré-tratamento com ozônio de efluentes contendo corantes azo, favorece a conversão das moléculas de corantes a compostos mais biodegradáveis, favorecendo assim o tratamento biológico.



### 5.3.4.3 Sólidos Totais e Suspensos

As análises de Sólidos foram realizadas com o efluente bruto (sem ozônio) e com os efluentes decantados (com e sem polímero, e ozonizado) do reator em contínuo, num tempo de decantação de 7 minutos.

A figura 57 mostra os valores médios de Sólidos Totais e Suspensos na entrada e saída do reator, com e sem polímero.

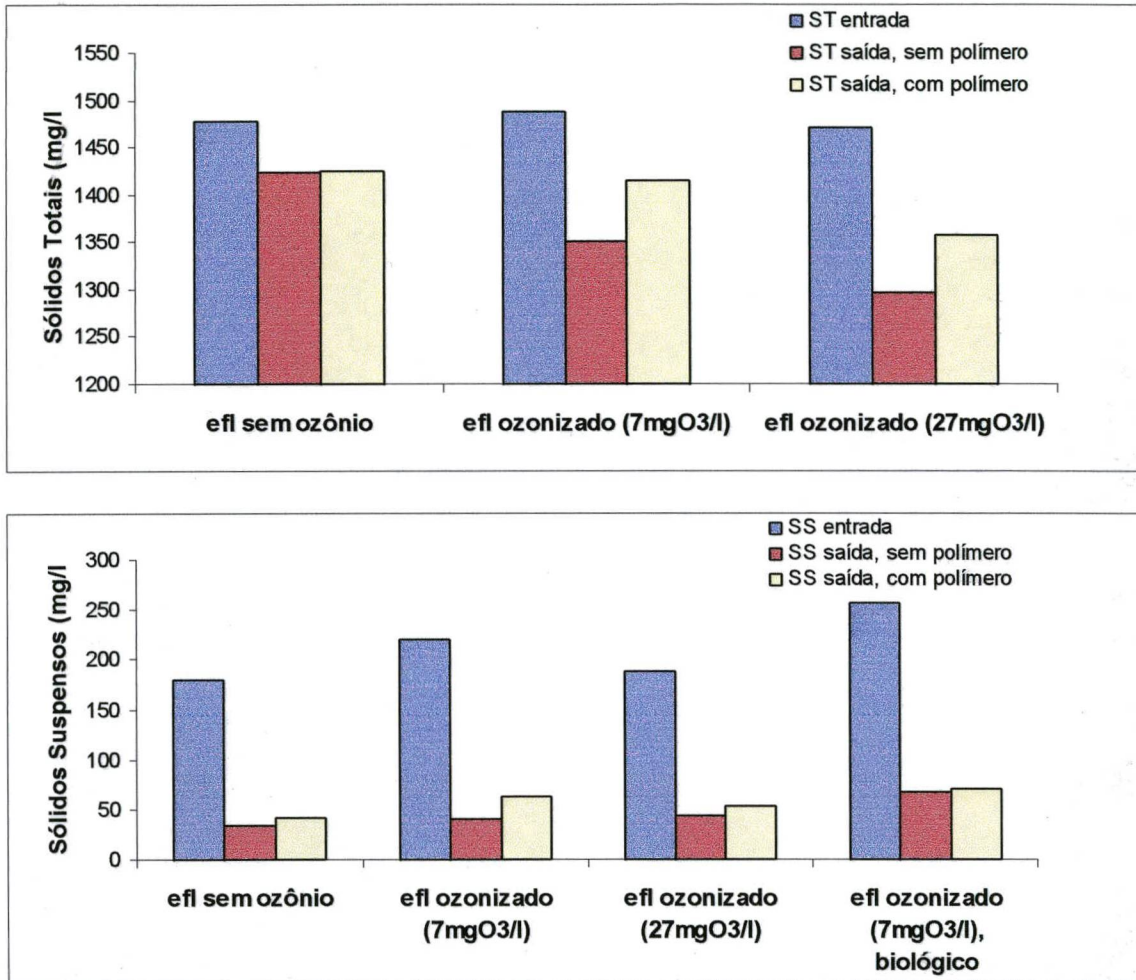


Figura 57 - Sólidos (totais e suspensos) de entrada e saída do piloto de floculação

Para os sólidos totais, a eficiência do tratamento para o efluente bruto (sem ozônio) foi de 4% para os ensaios com e sem polímero; com o efluente ozonizado 7 mgO<sub>3</sub>/l, a eficiência foi de 9% sem polímero e de 4% com polímero; com o efluente ozonizado 27 mgO<sub>3</sub>/l, a eficiência foi de 12% sem polímero e de 8% com polímero.

Para os sólidos suspensos, a eficiência para o efluente bruto (sem ozônio) foi de 82% sem polímero e de 77% com polímero; com o efluente ozonizado 7 mgO<sub>3</sub>/l, a eficiência foi de

78% sem polímero e de 65% com polímero; com o efluente ozonizado a 27 mgO<sub>3</sub>/l, a eficiência foi de 76% sem polímero e de 70% com polímero; com o efluente biológico, a eficiência foi de 62% sem polímero e de 61% com polímero.

Os efluentes ozonizados tiveram um aumento nos sólidos suspensos devido ao fato de que alguns sólidos dissolvidos do efluente original foram convertidos em sólidos suspensos durante a ozonização. Depois da coagulação química, a redução foi bastante acentuada, como pode ser observado nos resultados, comprovando assim o desempenho do floculador em estudo.

#### *5.4 ESTUDO EM DESCONTÍNUO: PÓS-OZONIZAÇÃO (Etapa 3)*

##### *5.4.1 Estudo em Descontínuo*

Nestes ensaios o efluente bruto foi submetido a ensaios de Jar-Test, com as dosagens otimizadas conforme a Etapa 1. Após 7 minutos de decantação, o efluente decantado foi recolhido e submetido à ozonização em diferentes concentrações. Os resultados dos ensaios podem ser vistos no Anexo 14.

A figura 58 mostra a redução da cor e turbidez do efluente decantado (7min), em relação a concentração de ozônio, com e sem polímero.

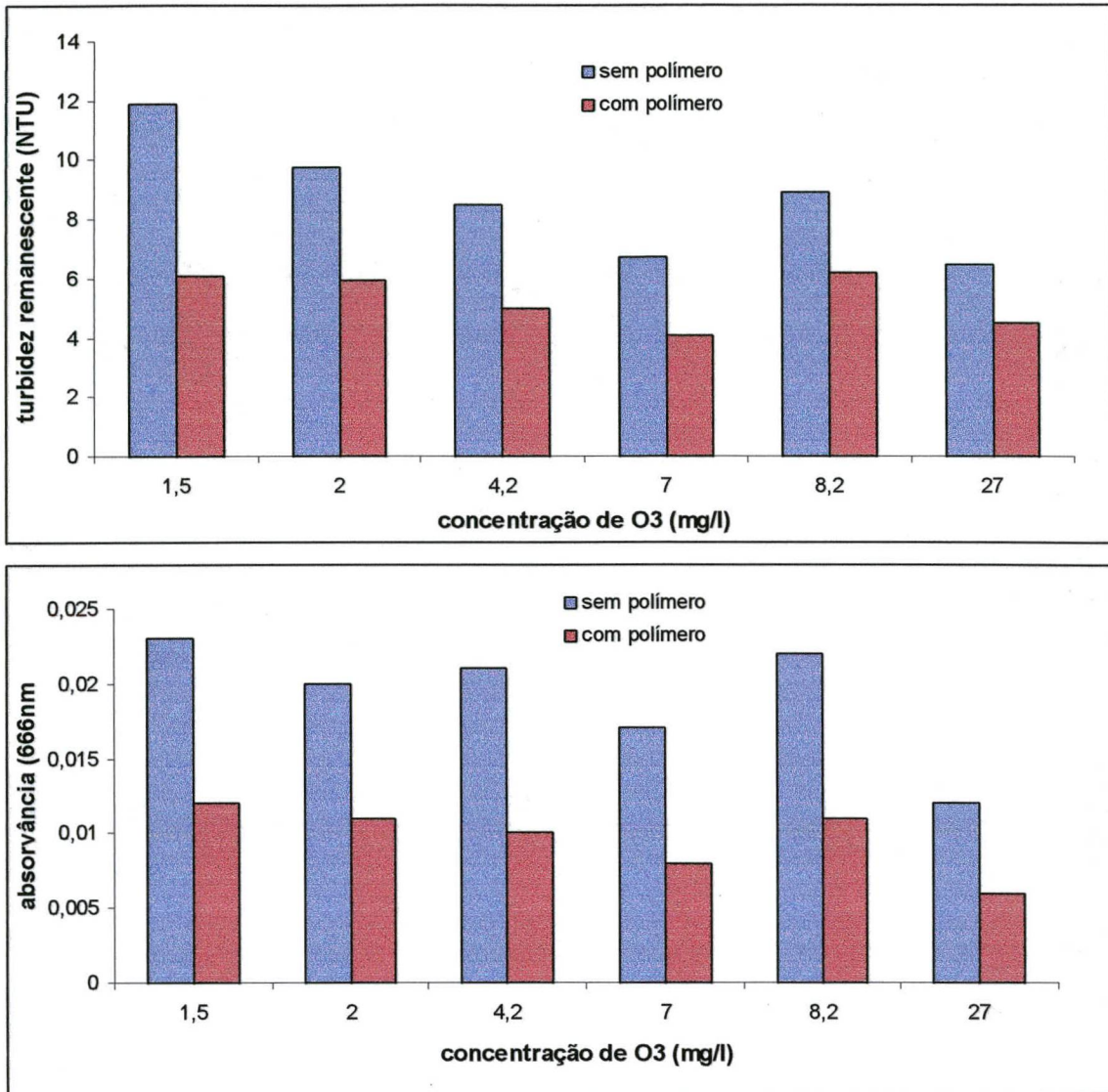


Figura 58 – Redução da cor (absorvância) e da turbidez para o efluente decantado (7min), em relação a concentração de ozônio

Estes resultados mostram que a remoção de cor e turbidez para o efluente decantado, pós-ozonizado com 7mgO<sub>3</sub>/l ou 27mgO<sub>3</sub>/l é praticamente a mesma, usando ou não o polímero. Porém, o melhor resultado foi para o ensaio com polímero, onde a eficiência de remoção de cor e turbidez foi praticamente a mesma (em torno de 98%), mostrando assim que não há necessidade de dosagens maiores de ozônio para se obter uma boa remoção desses parâmetros.

Uma pequena dosagem de ozônio também minimiza o consumo do gás, sendo muito importante, pois o fator econômico é primordial em qualquer etapa de tratamento.



## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou alternativas de tratamento de efluentes têxteis, através de processos físico-químicos de floculação em meio granular expandido e oxidação com ozônio. Os experimentos foram realizados em contínuo e descontínuo, observando-se a eficiência do tratamento, quanto a redução de parâmetros como cor, turbidez, sólidos totais e suspensos, DQO total e solúvel, e COD, dos efluentes bruto, ozonizado e tratado biologicamente.

De acordo com o trabalho realizado, concluiu-se que:

- Os ensaios de coagulação-floculação do despejo industrial determinaram uma dosagem bastante alta de coagulante (sulfato de alumínio) e que o mesmo requer também uma grande quantidade de álcali (cal) para manter a alcalinidade necessária para o bom desempenho da floculação, porém esta dosagem de coagulante é bem menor que a aplicada na própria indústria (800 mg/l). As concentrações ótimas de sulfato de alumínio e de cal apresentaram valores na ordem de 500 mg de sulfato de alumínio e 600 mg/l de óxido de cálcio (cal).
- A utilização do polímero (não iônico, PRAESTOL 2500) como auxiliar de coagulação, fez com que a dosagem de cal caísse pela metade. A concentração ótima de sulfato de alumínio ficou em 500 mg/l e a de cal em 300 mg/l, para os ensaios com o polímero.
- Apesar do tempo de floculação no floculador granular ser de apenas 3 minutos, a eficiência de remoção foi boa, equivalendo à do Jar Test no tempo de 21 minutos, ou numa floculação convencional que varia de 20 a 40 minutos.

- Os ensaios de ozonização demonstraram que o ozônio reage rapidamente com os corantes presentes no efluente têxtil. A ozonização permitiu descolorir eficazmente a cor do efluente estudado.
- A ozonização promoveu um aumento nos níveis de DQO, COD, sólidos suspensos e na turbidez do efluente ozonizado, devido a quebra das moléculas estruturadas dos corantes, e da transformação de sólidos dissolvidos em sólidos suspensos durante a ozonização, mas a redução desses parâmetros é bastante acentuada após o processo de coagulação-floculação-decantação.
- Os melhores resultados em termos de redução de DQO e COD foram aqueles em que após a ozonização, o efluente recebe o tratamento biológico, seguido de tratamento físico-químico. A eficiência para a DQO foi de 80% sem polímero e 89% com polímero; para o COD, 75% sem polímero e 78% com polímero, para um tempo de decantação de 7 minutos.
- Para este efluente especificamente, em termos de remoção de cor e turbidez, o melhor tratamento foi somente a coagulação-floculação, sem polímero e sem a pré-ozonização, com uma eficiência de 98 e 97 % respectivamente.

Com base nos resultados, recomenda-se:

- A realização de estudos empregando a pré-filtração do efluente para a eliminação do material em suspensão, antes da ozonização.
- Ensaio empregando após a floculação em meio granular, uma filtração sem decantação prévia.
- Ensaio com outros tipos de polímeros para o efluente têxtil aqui estudado.
- Um estudo mais aprofundado com a associação de tratamento biológico e tratamento físico-químico, de modo a otimizar o processo.
- Estudo da toxicidade do efluente bruto, ozonizado, e depois do tratamento final.
- Desenvolver estudos econômicos na otimização dos parâmetros de tratabilidade do efluente têxtil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADIN, A. Particle Characteristics: a Key Factor in Effluent Treatment and Reuse. **Water Science and Technology**. V.40, N°4-5, p.67-74, 1999.
- APHA, **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**, 18 ed. American Public Health Association, Washington, D.C., 1992.
- AYOUB, G. M., A Model for Flocculation in a Gravel Reactor: Development and Assessment. **J. Water SRT - Aqua**. V 45, n°2, p. 76-83, 1996.
- BABUNA, F. G., SOYHAN, B., EREMEKTAR, G. e ORHON, D. Evaluation of Treatability for Two Textile Mill Effluents. **Water Science and Technology**. V.40, N°1, p.145-152, 1999.
- BARTHEL, L. **Estudo de Biofilme Desenvolvido em Reator de Leito Fluidizado Trifásico Aeróbio no Tratamento de Efluentes Têxteis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 1998..
- BELTRÁN, F. J., ENCINAR, J. M. e GONZÁLEZ, J. F. Industrial Wastewater Advanced Oxidation. Part 2. Ozone Combined With Hydrogen Peroxide or UV Radiation. **Water Research**. V.31, N°10, p.2415-2428, 1997.
- BERGNA, G., BIANCHI, R. e MALPEI, F. GAC Adsorption of Ozonated Secondary Textile Effluents for Industrial Water Reuse. **Water Science and Technology**. V.40, N°4-5, p.435-442, 1999.
- BRAILE, P. M. e CAVALCANTI, J. E. W. **Manual de Tratamento de Águas Residuárias Industriais**, São Paulo, CETESB, 1993.
- CAMEL, V. e BERMOND, A. The Use of Ozone and Associated Oxidation Process in Drinking Water Treatment. **Water Research**.v.32, N°11, p.3208-3222, 1998.
- CUBAS, A. L. V. **Floculação em Meio Granular Expandido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 1999.
- DALSASSO, R. L. **Pré-Ozonização de Águas Contendo Agrotóxico, Seguida de Filtração Direta**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 1999.

- DI BERNARDO, L. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. ABES. Rio de Janeiro. 1993.
- DI BERNARDO, L. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. V.1e2, ABES, Rio de Janeiro, 1993.
- DI BERNARDO, L., DE PÁDUA, V. L. e LIBÂNIO, M. **Otimizacion de Gradientes de Velocidad en la Floculacion**. Seminário sobre Optimizacion de Plantas de Potabilizacion, XXVI Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitária y Ambiental. Lima – Peru, 1999.
- ERNEST, A. N., BONNER, J. S. e AUTENRIETH, R. L. Determination of Particle Collision Efficiencies for Flocculent Transport Models. **Journal of Environmental Engineering**. V.121, Nº4, p.320-329, 1995.
- FERREIRA, S. S. F. e LAGE, F.A.F. Comportamento Químico do Alumínio e do Ferro em Meio Aquoso e Implicações no Tratamento de Água. **Revista SANARE**. V.6, Nº6, p.50-58, 1997.
- FIESC – **Santa Catarina em Dados** – Relatórios do Setor Econômico e Estatístico da Fundação Das Indústrias de Santa Catarina. V.7. Florianópolis, 1996.
- HAARHOFF, J. e JOUBERT, H. Determination of Agregation and Breakup Constant During Flocculation. **Water Science and Tecnology**. V.36, Nº4, p.33-40, 1997.
- KARCHER, S., KORNMULLER, A. e JEKEL, M. Removal of Reactive Dyes by Sorption/Complexation with Cucurbituril. **Water Science and Technology**. V.40, Nº4-5, p.425-433, 1999.
- KAWAMURA, S. Optimisation of Basic Water – Treatment Process – Design and Operation: Coagulation and Flocculation. **Aqua**. V.45, Nº1, p.35-47, Fev, 1997.
- KOETHER, M. C., DEUTSCHMAN, J. E., e vanLOON, G. W. Low-Cost Polymeric Aluminum Coagulant. **Journal of Environmental Engineering**. p.859-864, 1997.
- KUNZ, A., REGINATTO, V., REYES, L. e DURÁN, N. Estudo da Toxicidade de Corantes Têxteis e seus Produtos de Degradação frente a Alga *Scenedesmus subspicatus*. In: Reunião Nacional de Microbiologia Aplicada ao Meio Ambiente. **Resumos ...** Florianópolis, 1998.
- LANGLAIS, B., RECKHOW, D.A. e BRINK, D. R. **Ozone in Water Treatment: Application and Enginnering**. American Water Association Research Foundation: Compagnie Générale des Eaux, Lewis Publishers, 1991, USA.

- LAZAROVA, V., SAVOYE, P., JANEX, M. L., BLATCHLEY, E. R. e POMMEPUY, M. Advanced Wastewater Disinfection Technologies. **Water Science and Technology**. V.40, N°4, 1999.
- LEME, F. P. **Teorias e Técnicas de Tratamento de Água**. ABES. Rio de Janeiro, 1990.
- LIAKOU, S., PAVLOU, S. e LYBERATOS, G. Ozonation of Azo Dyes. **Water Science and Technology**. V.35, N°4, p.279-286, 1997.
- LIN, S. H. e CHEN, M. L. Treatment of Textile Wastewater by Chemical Methods for Reuse. **Water Research**. V.31, N°4, p.868-876, 1997.
- LIN, S. H. e LIN, C. M. Treatment of Textile Waste Effluents by Ozonation and Chemical Coagulation. **Water Research**. V.27, N°12, p.1743-1748, 1993.
- LIN, S. H. e LIU, W. Y. Continuous Treatment of Textile Water by Ozonation and Coagulation. **Journal of Environmental Engineering**, V.120, p.437-446, 1994a.
- LIN, S. H. e LIU, W. Y. Treatment of Textile Wastewater by Ozonation in a Packed-Bed Reactor. **Environmental Technology**. V.15, p.299-311, 1994b.
- LOPEZ, A., RICCO, G., CIANNARELLA, R., ROZZI, A., Di PINTO, A. C. e PASSINO, R. Textile Wastewater Reuse: Ozonation of Membrane Concentrated Secondary Effluent. **Water Science and Technology**. V.40, N°4-5, p.99-105, 1999.
- MARMAGNE, O. e COSTE, C. Color Removal from Textile Olant Effluents. **American Dyestuff Reporter**. p.15-21, 1996.
- MARTINS, G. B. Práticas Limpas Aplicadas as Indústrias Têxteis de Santa Catarina. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Florianópolis, 1997. Departamento de Engenharia de Produção – UFSC.
- MCCONNACHIE, G. L., FOLKARD, G. K., MTAWALI, M. A. e SUTHERLAND, J. P. Field Trials of Appropriate Hydraulic Flocculation Processes. **Water Research**. V.33, N°6, p.1425-1434, 1999.
- MELO FILHO, L. C. **Efeito da pré-ozonização na geração de lodo em processos de coagulação-floculação no tratamento de efluentes têxteis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 1997.
- NAYME, C. Étude de la Dégradation par Ozonation de Deux Colorants Utilisés en Teinture: recherche de sous-produits, études cinétiques et influence sur les applications industrielles. Rennes, 1997. Tese de Doutorado n.1673, Université Rennes I, France.
- PAK, D. e CHANG, W. Decolorizing Dye Wastewater with Low Temperature Catalytic Oxidation. **Water Science and Technology**. V.40, N°4-5, p.115-121, 1999.



- RAIZER, E. Uma Nova Realidade para a Engenharia Química. **Revista Profissional**. Nº0, p. 16, 1996.
- RAKOCZI, F. Multistage Ozone Treatment of Dye Waste. **Ozone Science and Engineering**. V.13, Nº91, p.11-21, 1991.
- RIBAS, F., FRÍAS, J., HUGUET, J. M. e LUCENA, F. Efficiency of Various Water Treatment Processes in the Removal of Biodegradable and Refractory Organic Matter. **Water Research**. V.31, Nº3, p.639-649, 1997.
- RICHTER, C. A. A Evolução Tecnológica do Tratamento de Água. **Revista DAE**. Nº161, p. 1-12, 1991.
- SALES, R. **Cinética da Degradação de Efluentes Têxteis por Biofilme em Leito Fluidizado Trifásico Aeróbio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 1999.
- SANIN, L. B. B. A Indústria Têxtil e o Meio Ambiente. **Tecnologia Meio Ambiente**. Trabalho apresentado no XIV Congresso da FLAQT – Caracas, p.13-34, 1997.
- SARASA, J., ROCHE, M. P., ORMAD, M. P., GIMENO, E., PUIG, A. e OVELLEIRO, J. L. Treatment of a Wastewater Resulting from Dyes Manufacturing with Ozone and Chemical Coagulation. **Water Research**. V.32, Nº9, p.2721-2727, 1998.
- SENS, M. L. **Floculação em Meio Granular Fixo e Expandido**. Trabalho submetido à banca do concurso de Magistério Superior para o Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - classe titular. Florianópolis, 1997.
- SENS, M. L. e HANSEN, S. **Floculação em Meio Granular Expandido**. Anais do 18º Congresso da ABES, 1995, Salvador - Ba.
- SENS, M. L. e MARTIN, Flocculation en Lit Garni de Billes Sphériques 10mm de Diamètre. **Aqua**. V. 41, Nº6, p. 340-344, 1991.
- SENS, M. L., LE SAUZE, N., LAPLANCHE, A. e LANGLAIS, B. Effets des anions minéraux sur la decomposition de l’ozone das l’eau. **Revue des Sciences de L’eau**. V.3, p.325-341, 1990.
- SENS, M. L., MELO FILHO, L.C. e LAPLANCHE, A. **Efeito da Pré-Ozonização sobre a Geração de Lodo em Processos Físico-Químico de Estações de Tratamento de Efluentes Têxteis**. Anais do 19º Congresso da ABES, 1997, Foz do Iguaçu – PR.
- SHOLJI, I. e KAZI, N. M. Kinetics of Pneumatic Flocculation. **Water Research**. V.31, Nº12, p.2979-2988, 1997.

- SIDDIQUI, M. S., AMY, G. L. e MURPHY B. D. Ozone Enhanced Removal of Natural Organic Matter from Drinking Water Sources. **Water Research**. V.31, N°12, p.3098-3106, 1997.
- SOBRINHO, J. A. H., THIEM, L. T. e ALKHATIB, E. A. Optimizing Submerged Jet Flocculator Performance. **Journal AWWA**, p.81-92, 1996.
- TAN, B. H., TENG, T. T. e OMAR, A. K. M. Removal of Dyes and Industrial Dye Wastes by Magnesium Chloride. **Water Research**. V.34, N°2, p.597-601, 2000.
- THOMAS, D. N., JUDD, S. J. e FAWCETT, N. Flocculation Modelling: a Review. **Water Research**. V.33, N°7, p.1579-1592, 1999.
- VANDEVIVERE, P. C., BIANCHI, R. e VERSTRAETE, W. Treatment and Reuse of Wastewater from the Textile Wet-Processing Industry: Review of Emerging Technologies. **J. Chem. Technol. Biotechnol.** N°72, p.289-302, 1998.
- VLYSSIDES, A. G. e ISRAILIDES, C. J. Characterization of Wastewaters from a Polyester and or Cellulosic Fibres Dyeing and Finishing Process. **Fresenius Envir. Bull.** V.6, p.705-710, 1997.
- WOLFF, D.B. **Estudo da Tratabilidade de um Efluente Têxtil por Biomassa Fixa através de um Reator de Leito Fluidizado Trifásico Aeróbio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 1997.

## **ANEXOS**

**ANEXO 1** – Resultados das análises relativas aos ensaios de coagulação-floculação do efluente bruto, objetivando encontrar o pH ótimo de floculação, a melhor dosagem de sulfato de alumínio e de cal.

**características dos ensaios:** 18/06/99

mistura rápida: 500 rpm- 30 s

mistura lenta: 33 rpm – 20 min

tempo de decantação (Td): 4 e 7 min

**características do efluente bruto:**

pH: 7,60

turbidez: 247 NTU

absorvância a 666 nm: 1,107

#### Ensaio 1

Jarro	Cal (mg/l)	Sulfato de Al (mg/l)	pH	Turbidez Td= 4min	Abs <sub>666</sub> Td=4 min	Turbidez Td= 7min	Abs <sub>666</sub> Td=7 min
1	0	450	5,60	291	0,846	78,6	0,178
2	0	500	5,36	284	0,860	70,9	0,148
3	0	550	5,26	291	0,860	70,1	0,145
4	0	600	5,11	296	0,833	62,9	0,127
5	0	650	4,90	283	0,831	62,2	0,125
6	0	700	4,96	298	0,802	63,6	0,123
7	0	750	4,85	312	0,855	66	0,157
8	0	800	4,80	311	0,868	72,7	0,151
9	0	850	4,74	314	0,855	64,9	0,125
10	0	900	4,70	330	0,909	69,1	0,136
11	0	950	4,62	347	0,935	76,6	0,156
12	0	1000	4,58	353	0,925	83,1	0,177

#### Ensaio 2

Jarro	Cal (mg/l)	Sulfato de Al (mg/l)	pH	Turbidez Td= 4min	Abs <sub>666</sub> Td=4 min	Turbidez Td= 7min	Abs <sub>666</sub> Td=7 min
1	50	450	5,76	258	0,769	66,8	0,143
2	50	500	5,66	282	0,845	58,7	0,119
3	50	550	5,49	308	0,915	76,7	0,167
4	50	600	5,37	312	0,937	67,5	0,141
5	50	650	5,22	335	0,917	78	0,168
6	50	700	5,10	335	0,907	70,1	0,140
7	50	750	4,94	352	0,967	69	0,132
8	50	800	4,87	358	0,976	63,6	0,122
9	50	850	4,76	363	0,894	75,5	0,151
10	50	900	4,67	359	0,977	67,6	0,128
11	50	950	4,62	372	0,935	77,1	0,150
12	50	1000	4,55	378	0,977	84,5	0,178

## Ensaio 3

Jarro	Cal (mg/l)	Sulfato de Al (mg/l)	pH	Turbidez Td= 4min	Abs <sub>666</sub> Td=4 min	Turbidez Td=7 min	Abs <sub>666</sub> Td=7 min
1	100	450	6,0	240	0,740	63,0	0,129
2	100	500	5,83	267	0,799	65,4	0,136
3	100	550	5,63	287	0,858	70,4	0,144
4	100	600	5,51	309	0,895	70,6	0,143
5	100	650	5,39	321	0,913	71,4	0,150
6	100	700	5,29	331	0,926	78,5	0,166
7	100	750	5,27	338	-----	76,8	0,130
8	100	800	5,09	350	-----	82,3	0,158
9	100	850	4,89	369	0,965	87,0	0,191
10	100	900	4,75	371	0,974	86,1	0,220
11	100	950	4,75	373	0,988	98,7	0,243
12	100	1000	4,66	385	0,976	94,6	0,237

características do efluente bruto: 19/06/99

pH: 7,71

turbidez: 238 NTU

absorvância a 666 nm: 1,074

## Ensaio 4

Jarro	Cal (mg/l)	Sulfato de Al (mg/l)	pH	Turbidez Td=4 min	Abs <sub>666</sub> Td=4 min	Turbidez Td=7 min	Abs <sub>666</sub> Td=7 min
1	200	450	6,33	128	0,574	53,6	0,100
2	200	500	6,31	140	0,541	57,7	0,112
3	200	550	6,18	175	0,622	51,3	0,103
4	200	600	6,07	198	0,660	58,2	0,115
5	200	650	5,98	220	0,700	58	0,118
6	200	700	5,86	251	0,800	66,7	0,113
7	200	750	5,69	284	0,783	67,7	0,141
8	200	800	5,73	282	0,806	64,8	0,131
9	200	850	5,42	315	0,865	84,5	0,194
10	200	900	5,28	325	0,873	86,5	0,194
11	200	950	5,30	321	0,883	88,9	0,219
12	200	1000	5,30	338	0,935	93,3	0,212



## Ensaio 5

Jarro	Cal (mg/l)	Sulfato de Al (mg/l)	pH	Turbidez Td=4 min	Abs <sub>666</sub> Td=4 min	Turbidez Td=7 min	Abs <sub>666</sub> Td=7 min
1	300	450	6,82	128	0,367	44,0	0,086
2	300	500	6,73	138	0,388	45,9	0,087
3	300	550	6,59	154	0,424	46,5	0,085
4	300	600	6,47	190	0,458	47,4	0,097
5	300	650	6,34	184	0,553	47,0	0,090
6	300	700	6,19	200	0,582	54,6	0,100
7	300	750	6,04	218	0,631	53,4	0,127
8	300	800	5,92	231	0,688	55,0	0,108
9	300	850	5,77	254	0,731	60,9	0,119
10	300	900	5,64	267	0,759	71,3	0,125
11	300	950	5,46	288	0,826	70,2	0,160
12	300	1000	5,37	296	0,813	72,8	0,158

## Ensaio 6

Jarro	Cal (mg/l)	Sulfato de Al (mg/l)	pH	Turbidez Td=4 min	Abs <sub>666</sub> Td=4 min	Turbidez Td=7 min	Abs <sub>666</sub> Td=7 min
1	400	450	6,83	89,5	0,211	38,8	0,067
2	400	500	6,72	93,8	0,242	40,8	0,075
3	400	550	6,63	98,3	0,257	40,0	0,069
4	400	600	6,42	106	0,284	39,1	0,066
5	400	650	6,22	120	0,328	42,7	0,073
6	400	700	6,14	137	0,367	45,4	0,082
7	400	750	6,16	182	0,503	46,4	0,085
8	400	800	6,09	192	0,530	45,0	0,083
9	400	850	6,02	207	0,540	51,4	0,095
10	400	900	5,92	213	0,607	50,0	0,092
11	400	950	5,83	238	0,640	63,0	0,122
12	400	1000	5,79	247	0,659	68,7	0,133

características do efluente bruto: 21/06/99

pH: 7,58

turbidez: 223 NTU

absorvância a 666 nm: 0,888

#### Ensaio 7

Jarro	Cal (mg/l)	Sulfato de Al (mg/l)	pH	Turbidez Td=4 min	Abs <sub>666</sub> Td=4 min	Turbidez Td=7 min	Abs <sub>666</sub> Td=7 min
1	500	450	7,62	106	0,254	45,7	0,08
2	500	500	7,4	122	0,292	46	0,086
3	500	550	7,01	118	0,283	46,1	0,076
4	500	600	6,9	115	0,308	45	0,077
5	500	650	6,82	120	0,300	42,7	0,079
6	500	700	6,72	125	0,282	40	0,070
7	500	750	6,55	120	0,315	41,6	0,068
8	500	800	6,40	127	0,342	44,8	0,076
9	500	850	6,27	155	0,429	47,9	0,083
10	500	900	6,23	151	0,404	47,4	0,076
11	500	950	6,23	143	0,372	49,6	0,081
12	500	1000	6,21	136	0,340	49,4	0,081

#### Ensaio 8

Jarro	Cal (mg/l)	Sulfato de Al (mg/l)	pH	Turbidez Td=4 min	Abs <sub>666</sub> Td=4 min	Turbidez Td=7 min	Abs <sub>666</sub> Td=7 min
1	600	450	7,78	65,9	0,120	37,4	0,061
2	600	500	7,27	44,5	0,108	32,1	0,052
3	600	550	7,09	74,4	0,135	34,1	0,058
4	600	600	7,0	58,7	0,105	32,7	0,056
5	600	650	6,92	63,2	0,114	32,1	0,052
6	600	700	6,86	91,6	0,213	41,7	0,076
7	600	750	6,60	119	0,338	36,1	0,061
8	600	800	6,86	123	0,335	36,7	0,064
9	600	850	6,76	126	0,356	32,8	0,060
10	600	900	6,25	153	0,449	39,4	0,060
11	600	950	6,42	112	0,317	36,5	0,063
12	600	1000	6,14	145	0,390	51,6	0,091

**ANEXO 2** – Resultados das análises relativas aos ensaios de coagulação-floculação do efluente bruto, objetivando otimizar a dosagem de polímero.

**características dos ensaios:**

mistura rápida: 500 rpm- 30 s

aplicação de polímero: após a mistura rápida, 175 rpm – 1 min; e 3 minutos após iniciar a

mistura lenta, 33 rpm – 1 min

mistura lenta: 33 rpm – 20 min

tempo de decantação (Td): 4 e 7 min

dosagem de polímero: 0,25 – 0,30 – 0,40 – 0,45 – 0,50 – 0,55 mg/l

características do efluente bruto: **25/06/99**

pH: 7,61

turbidez: 220 NTU

absorvância a 666 nm: 0,888

**Ensaio 9 - (Ponto A1)**

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Td=2min Vs = 3,5 cm/min		Td=4min Vs = 1,75 cm/min		Td=5,5min Vs = 1,27 cm/min		Td=7min Vs = 1,0 cm/min	
					(NTU)	Abs <sub>666</sub>	(NTU)	Abs <sub>666</sub>	(NTU)	Abs <sub>666</sub>	(NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0,25	7,08	300	500	62,3	0,112	14,7	0,031	29,3	0,022	8,93	0,017
2	0,30	7,08	300	500	67,4	0,120	18,1	0,032	16	0,027	12,3	0,023
3	0,40	7,08	300	500	32,9	0,053	8,93	0,017	8,86	0,016	7,61	0,015
4	0,45	7,08	300	500	27,5	0,046	9,39	0,017	7,41	0,014	6,29	0,012
5	0,50	7,08	300	500	25	0,042	8,83	0,020	6,42	0,015	6,45	0,013
6	0,55	7,08	300	500	92,7	0,148	30,6	0,045	20,1	0,027	11,7	0,025

**Ensaio 10 (Ponto A2)**

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Td=2min Vs = 3,5 cm/min		Td=4min Vs = 1,75 cm/min		Td=5,5min Vs = 1,27 cm/min		Td=7min Vs = 1,0 cm/min	
					(NTU)	Abs <sub>666</sub>	(NTU)	Abs <sub>666</sub>	(NTU)	Abs <sub>666</sub>	(NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0,25	7,26	400	550	261	0,615	40,9	0,084	22,3	0,045	17,8	0,033
2	0,30	7,26	400	550	240	0,472	36,1	0,067	21,2	0,039	20,9	0,043
3	0,40	7,26	400	550	255	0,487	37,3	0,075	23,2	0,046	19,5	0,036
4	0,45	7,26	400	550	160	0,340	28,8	0,049	16,7	0,032	15,8	0,028
5	0,50	7,26	400	550	218	0,444	35,7	0,070	20,3	0,034	18,8	0,040
6	0,55	7,26	400	550	186	0,402	30,9	0,056	19,4	0,033	19,6	0,037

## Ensaio 11 (Ponto A3)

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Td=2min Vs = 3,5 cm/min		Td=4min Vs = 1,75 cm/min		Td=5,5min Vs = 1,27 cm/min		Td=7min Vs = 1,0 cm/min	
					(NTU)	Abs <sub>666</sub>	(NTU)	Abs <sub>666</sub>	(NTU)	Abs <sub>666</sub>	(NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0,25	7,75	600	500	299	0,483	37,5	0,071	25,3	0,049	21,2	0,041
2	0,30	7,75	600	500	307	0,634	37,4	0,073	26,9	0,049	20,7	0,042
3	0,40	7,75	600	500	313	0,587	35,9	0,067	21,7	0,045	18	0,036
4	0,45	7,75	600	500	285	0,444	32,4	0,061	24,8	0,043	18,1	0,034
5	0,50	7,75	600	500	255	0,492	39,4	0,078	29,8	0,061	24,1	0,054
6	0,55	7,75	600	500	300	0,589	38,1	0,072	21,6	0,040	21,6	0,039

Nos ensaios 9, 10 e 11, o polímero foi adicionado após a mistura rápida.

## Ensaio 12 (Ponto A1)

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Td=2min Vs = 3,5 cm/min		Td=4min Vs = 1,75 cm/min		Td=5,5min Vs = 1,27 cm/min		Td=7min Vs = 1,0 cm/min	
					(NTU)	Abs <sub>666</sub>	(NTU)	Abs <sub>666</sub>	(NTU)	Abs <sub>666</sub>	(NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0,25	7,03	300	500	225	0,528	32,4	0,057	17,4	0,035	13,4	0,032
2	0,30	7,03	300	500	249	0,510	29,8	0,077	18,7	0,035	17,2	0,038
3	0,40	7,03	300	500	263	0,500	30,6	0,060	16,5	0,036	15,0	0,029
4	0,45	7,03	300	500	215	0,493	27,7	0,055	16,6	0,032	14,6	0,032
5	0,50	7,03	300	500	204	0,503	31,3	0,058	16,4	0,028	14,8	0,028
6	0,55	7,03	300	500	241	0,430	26,3	0,049	14,8	0,026	15,5	0,030

## Ensaio 13 (Ponto A2)

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Td=2min Vs = 3,5 cm/min		Td=4min Vs = 1,75 cm/min		Td=5,5min Vs = 1,27 cm/min		Td=7min Vs = 1,0 cm/min	
					(NTU)	Abs <sub>666</sub>	(NTU)	Abs <sub>666</sub>	(NTU)	Abs <sub>666</sub>	(NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0,25	7,46	400	550	189	0,424	22,4	0,041	14,3	0,030	10,5	0,024
2	0,30	7,46	400	550	240	0,436	21,7	0,042	14,4	0,027	12,8	0,031
3	0,40	7,46	400	550	169	0,400	21,0	0,045	14,3	0,032	13,6	0,031
4	0,45	7,46	400	550	171	0,300	17,8	0,030	15,4	0,028	10,5	0,024
5	0,50	7,46	400	550	161	0,312	17,5	0,036	14,1	0,029	12,1	0,027
6	0,55	7,46	400	550	104	0,240	22,1	0,037	14,5	0,032	10,4	0,025

## Ensaio 14 (Ponto A3)

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Td=2min Vs = 3,5 cm/min		Td=4min Vs = 1,75 cm/min		Td=5,5min Vs = 1,27 cm/min		Td=7min Vs = 1,0 cm/min	
					NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>
1	0,25	7,68	600	500	86,2	0,155	25,8	0,055	19,3	0,051	20,3	0,050
2	0,30	7,68	600	500	111,0	0,192	22,6	0,047	18,7	0,045	19,5	0,046
3	0,40	7,68	600	500	103	0,177	22,9	0,052	20,7	0,050	19,7	0,046
4	0,45	7,68	600	500	98,5	0,193	25,2	0,053	21,0	0,047	19,8	0,047
5	0,50	7,68	600	500	102,0	0,168	32,9	0,066	26,8	0,060	28,6	0,069
6	0,55	7,68	600	500	120	0,195	28,5	0,061	21,5	0,042	18,9	0,047

Nos ensaios 12, 13 e 14, o polímero foi adicionado 3 minutos após iniciar a mistura lenta.



**ANEXO 3 - Resultados das análises relativas aos ensaios de coagulação-floculação do efluente bruto, objetivando otimizar o gradiente de velocidade e o tempo de mistura rápida.**

**características dos ensaios:**

mistura rápida:  $G = 600, 900$  e  $1200 \text{ s}^{-1}$  (variável para cada ensaio)

tempo de mistura rápida: 5, 10, 15, 20, 25 e 30 s (variável para cada jarro)

aplicação de polímero: após a mistura rápida,  $G = 200 \text{ s}^{-1} - 1 \text{ min}$

mistura lenta:  $G = 20 \text{ s}^{-1} - 20 \text{ min}$

tempo de decantação ( $T_d$ ): 4 e 7 min

características do efluente bruto: **08/07/99**

pH: 7,57

turbidez: 142 NTU

absorvância a 666 nm: 0,593

**Ensaio 15**

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Grad. G ( $\text{s}^{-1}$ )	Tempo de Mistura Rápida(s)	Td=4 min		Td=7 min	
							Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0	8,22	600	500	600	5	8,48	0,021	7,41	0,020
2	0	8,22	600	500	600	10	12,5	0,032	11,8	0,030
3	0	8,22	600	500	600	15	14,1	0,032	11,0	0,027
4	0	8,22	600	500	600	20	14,3	0,030	11,8	0,026
5	0	8,22	600	500	600	25	17,4	0,037	12,3	0,028
6	0	8,22	600	500	600	30	17,8	0,039	11,6	0,027

**Ensaio 16**

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Grad. G ( $\text{s}^{-1}$ )	Tempo de Mistura Rápida(s)	Td=4 min		Td=7 min	
							Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0	8,51	600	500	900	5	11,1	0,025	8,37	0,021
2	0	8,51	600	500	900	10	10,5	0,024	10,0	0,024
3	0	8,51	600	500	900	15	11,6	0,027	9,13	0,024
4	0	8,51	600	500	900	20	16,1	0,035	11,2	0,027
5	0	8,51	600	500	900	25	16,1	0,034	13,0	0,029
6	0	8,51	600	500	900	30	21,0	0,040	11,5	0,027

características do efluente bruto: 13/07/99

pH: 7,70

turbidez: 161 NTU

absorvância a 666 nm: 0,637

#### Ensaio 17

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Grad. G (s <sup>-1</sup> )	Tempo de Mistura Rápida(s)	Td=4 min		Td=7 min	
							Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0	8,14	600	500	1200	5	11,9	0,034	10,4	0,030
2	0	8,14	600	500	1200	10	17,7	0,041	13,8	0,035
3	0	8,14	600	500	1200	15	17,0	0,048	14,6	0,044
4	0	8,14	600	500	1200	20	15,5	0,045	16,2	0,043
5	0	8,14	600	500	1200	25	22,0	0,048	15,2	0,038
6	0	8,14	600	500	1200	30	18,6	0,044	14,1	0,037

características do efluente bruto: 14/07/99

pH: 7,71

turbidez: 238

absorvância a 666 nm: 1,074

#### Ensaio 18

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Grad. G (s <sup>-1</sup> )	Tempo de Mistura Rápida(s)	Td=4 min		Td=7 min	
							Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0,45	7,46	300	500	600	5	4,71	0,011	4,77	0,010
2	0,45	7,46	300	500	600	10	4,12	0,008	4,68	0,009
3	0,45	7,46	300	500	600	15	7,50	0,013	6,52	0,014
4	0,45	7,46	300	500	600	20	24,7	0,045	11,4	0,023
5	0,45	7,46	300	500	600	25	8,75	0,018	8,21	0,016
6	0,45	7,46	300	500	600	30	21,3	0,046	14,9	0,037

## Ensaio 19

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Grad. G (s <sup>-1</sup> )	Tempo de Mistura Rápida(s)	Td=4 min		Td=7 min	
							Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0,45	7,41	300	500	900	5	8,77	0,020	5,88	0,012
2	0,45	7,41	300	500	900	10	9,41	0,018	9,02	0,016
3	0,45	7,41	300	500	900	15	9,81	0,021	7,64	0,016
4	0,45	7,41	300	500	900	20	13,2	0,026	6,90	0,014
5	0,45	7,41	300	500	900	25	9,46	0,021	9,91	0,018
6	0,45	7,41	300	500	900	30	16,3	0,030	10,2	0,021

## Ensaio 20

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Grad. G (s <sup>-1</sup> )	Tempo de Mistura Rápida(s)	Td=4 min		Td=7 min	
							Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0,45	7,33	300	500	1200	5	3,99	0,010	4,23	0,010
2	0,45	7,33	300	500	1200	10	4,99	0,012	5,51	0,013
3	0,45	7,33	300	500	1200	15	5,33	0,011	5,45	0,012
4	0,45	7,33	300	500	1200	20	4,61	0,010	5,87	0,012
5	0,45	7,33	300	500	1200	25	5,83	0,012	5,74	0,012
6	0,45	7,33	300	500	1200	30	9,23	0,019	5,79	0,013

**ANEXO 4** - Resultados das análises relativas aos ensaios de coagulação-floculação do efluente bruto, objetivando otimizar o gradiente de velocidade e o tempo de mistura lenta.

**características dos ensaios:**

mistura rápida:  $G = 600 \text{ s}^{-1}$  (sem polímero) e  $G = 1200 \text{ s}^{-1}$  (com polímero)

tempo de mistura rápida: 5 segundos (com e sem polímero)

aplicação de polímero: após a mistura rápida,  $G = 200 \text{ s}^{-1} - 1 \text{ min}$

mistura lenta:  $G = 20, 30, 40, 65, 75$  e  $85 \text{ s}^{-1}$  (variável para cada ensaio)

tempo de mistura lenta: 5, 10, 15, 20, 30 e 45 min (variável para cada jarro)

tempo de decantação ( $T_d$ ): 4 e 7 min

características do efluente bruto: 15/07/99

pH: 7,70

turbidez: 139 NTU

absorvância a 666 nm: 0,534

Ensaio 21

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Mistura Rápida		Mistura Lenta (floculação)		T <sub>d</sub> =4 min		T <sub>d</sub> =7 min	
					Tempo (s)	G (s <sup>-1</sup> )	Tempo (min.)	G (s <sup>-1</sup> )	Turb (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turb (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0	7,70	600	500	5	600	5	85	15,7	0,045	14,4	0,042
2	0	7,70	600	500	5	600	10	85	19,1	0,053	20,3	0,053
3	0	7,70	600	500	5	600	15	85	17,5	0,046	16,0	0,045
4	0	7,70	600	500	5	600	20	85	17,1	0,043	14,4	0,038
5	0	7,70	600	500	5	600	30	85	18,5	0,042	15,7	0,038
6	0	7,70	600	500	5	600	45	85	17,9	0,038	16,8	0,039
1	0,45	7,03	300	500	5	1200	5	85	11,3	0,023	9,92	0,018
2	0,45	7,03	300	500	5	1200	10	85	11,3	0,022	8,61	0,019
3	0,45	7,03	300	500	5	1200	15	85	18,1	0,033	11,0	0,022
4	0,45	7,03	300	500	5	1200	20	85	14,4	0,031	12,8	0,022
5	0,45	7,03	300	500	5	1200	30	85	13,2	0,027	9,80	0,021
6	0,45	7,03	300	500	5	1200	45	85	13,4	0,028	10,5	0,025

## Ensaio 22

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Mistura Rápida		Mistura Lenta (floculação)		Td=4 min		Td=7 min	
					Tempo (s)	G ( $s^{-1}$ )	Tempo (min.)	G ( $s^{-1}$ )	Turb (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turb (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0	7,90	600	500	5	600	5	20	15,5	0,050	17,6	0,050
2	0	7,90	600	500	5	600	10	20	17,4	0,052	15,8	0,050
3	0	7,90	600	500	5	600	15	20	14,6	0,040	13,7	0,037
4	0	7,90	600	500	5	600	20	20	17,0	0,037	13,6	0,034
5	0	7,90	600	500	5	600	30	20	15,4	0,036	14,4	0,035
6	0	7,90	600	500	5	600	45	20	18,3	0,037	15,9	0,032
1	0,45	7,18	300	500	5	1200	5	20	8,42	0,017	6,61	0,012
2	0,45	7,18	300	500	5	1200	10	20	6,52	0,013	5,51	0,011
3	0,45	7,18	300	500	5	1200	15	20	6,01	0,012	4,33	0,010
4	0,45	7,18	300	500	5	1200	20	20	5,35	0,011	4,57	0,009
5	0,45	7,18	300	500	5	1200	30	20	3,73	0,009	3,68	0,008
6	0,45	7,18	300	500	5	1200	45	20	3,92	0,008	3,80	0,007

características do efluente bruto: 20/07/99

pH: 7,65

turbidez: 133

absorvância a 666 nm: 0,618

## Ensaio 23

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Mistura Rápida		Mistura Lenta (floculação)		Ts=4 min		Ts=7 min	
					Tempo (s)	G ( $s^{-1}$ )	Tempo (min.)	G ( $s^{-1}$ )	Turb (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turb (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0	7,95	600	500	5	600	5	30	18,9	0,049	18,0	0,048
2	0	7,95	600	500	5	600	10	30	15,7	0,033	15,3	0,033
3	0	7,95	600	500	5	600	15	30	19,5	0,042	17,5	0,039
4	0	7,95	600	500	5	600	20	30	22,5	0,046	20,2	0,041
5	0	7,95	600	500	5	600	30	30	19,1	0,037	15,9	0,031
6	0	7,95	600	500	5	600	45	30	21,5	0,043	13,1	0,030
1	0,45	7,06	300	500	5	1200	5	30	7,35	0,014	5,60	0,012
2	0,45	7,06	300	500	5	1200	10	30	7,66	0,013	6,21	0,012
3	0,45	7,06	300	500	5	1200	15	30	6,55	0,012	6,29	0,013
4	0,45	7,06	300	500	5	1200	20	30	7,65	0,018	4,48	0,013
5	0,45	7,06	300	500	5	1200	30	30	3,88	0,010	3,56	0,009
6	0,45	7,06	300	500	5	1200	45	30	5,75	0,014	3,02	0,008



## Ensaio 24

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Mistura Rápida		Mistura Lenta (floculação)		Td=4 min		Td=7 min	
					Tempo (s)	G ( $s^{-1}$ )	Tempo (min.)	G ( $s^{-1}$ )	Turb (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turb (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0	8,36	600	500	5	600	5	40	15,5	0,040	14,3	0,036
2	0	8,36	600	500	5	600	10	40	14,3	0,033	12,9	0,031
3	0	8,36	600	500	5	600	15	40	14,1	0,030	11,9	0,028
4	0	8,36	600	500	5	600	20	40	15,3	0,037	15,5	0,037
5	0	8,36	600	500	5	600	30	40	12,5	0,033	12,6	0,032
6	0	8,36	600	500	5	600	45	40	17,2	0,037	12,1	0,032
1	0,45	7,06	300	500	5	1200	5	40	12,1	0,023	9,38	0,017
2	0,45	7,06	300	500	5	1200	10	40	15,9	0,029	7,53	0,016
3	0,45	7,06	300	500	5	1200	15	40	14,5	0,026	11,4	0,019
4	0,45	7,06	300	500	5	1200	20	40	10,3	0,022	8,79	0,015
5	0,45	7,06	300	500	5	1200	30	40	13,2	0,025	9,69	0,019
6	0,45	7,06	300	500	5	1200	45	40	14,3	0,031	6,90	0,015

características do efluente bruto: 23/07/99

pH: 7,57

turbidez: 197

absorvância a 666 nm: 0,867

Ensaio 25

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Mistura Rápida		Mistura Lenta (floculação)		Td=4 min		Td=7 min	
					Tempo (s)	G ( $s^{-1}$ )	Tempo (min.)	G ( $s^{-1}$ )	Turb (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turb (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0	8,80	600	500	5	600	5	65	18,5	0,053	14,5	0,043
2	0	8,80	600	500	5	600	10	65	15,1	0,040	14,7	0,037
3	0	8,80	600	500	5	600	15	65	16,5	0,043	14,1	0,040
4	0	8,80	600	500	5	600	20	65	18,7	0,043	14,1	0,035
5	0	8,80	600	500	5	600	30	65	19,4	0,046	15,7	0,040
6	0	8,80	600	500	5	600	45	65	21,3	0,046	17,3	0,038
1	0,45	7,06	300	500	5	1200	5	65	15,8	0,031	10,7	0,025
2	0,45	7,06	300	500	5	1200	10	65	17,5	0,035	11,6	0,024
3	0,45	7,06	300	500	5	1200	15	65	19,6	0,040	13,8	0,029
4	0,45	7,06	300	500	5	1200	20	65	15,3	0,032	11,2	0,026
5	0,45	7,06	300	500	5	1200	30	65	18,7	0,041	10,5	0,021
6	0,45	7,06	300	500	5	1200	45	65	19,2	0,041	14,7	0,033

## Ensaio 26

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Mistura Rápida		Mistura Lenta (floculação)		Td=4 min		Td=7 min	
					Tempo (s)	G ( $s^{-1}$ )	Tempo (min.)	G ( $s^{-1}$ )	Turb (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turb (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0	8,78	600	500	5	600	5	75	19,5	0,054	15,8	0,052
2	0	8,78	600	500	5	600	10	75	22,2	0,048	18,2	0,048
3	0	8,78	600	500	5	600	15	75	19,8	0,048	16,4	0,044
4	0	8,78	600	500	5	600	20	75	18,7	0,044	18,6	0,046
5	0	8,78	600	500	5	600	30	75	21,2	0,052	20,1	0,049
6	0	8,78	600	500	5	600	45	75	21,1	0,049	20,3	0,048
1	0,45	7,15	300	500	5	1200	5	75	11,8	0,028	9,16	0,020
2	0,45	7,15	300	500	5	1200	10	75	13,3	0,028	10,5	0,024
3	0,45	7,15	300	500	5	1200	15	75	15,4	0,033	9,52	0,021
4	0,45	7,15	300	500	5	1200	20	75	14,5	0,030	8,62	0,021
5	0,45	7,15	300	500	5	1200	30	75	25,4	0,053	9,28	0,024
6	0,45	7,15	300	500	5	1200	45	75	27,7	0,062	11,3	0,026

**ANEXO 5** - Resultados das análises relativas aos ensaios de coagulação-floculação do efluente bruto, para escolher a melhor sequência de gradientes, e o melhor tempo de floculação, que serão adotados nas colunas de floculação (piloto).

**características dos ensaios:**

mistura rápida:  $G = 600 \text{ s}^{-1}$  (sem polímero) e  $G = 1200 \text{ s}^{-1}$  (com polímero)

tempo de mistura rápida: 5 segundos (com e sem polímero)

aplicação de polímero: após a mistura rápida,  $G = 200 \text{ s}^{-1} - 1 \text{ min}$

mistura lenta:  $G = 50, 30, 20 \text{ s}^{-1}$ ;  $G = 40, 30, 20 \text{ s}^{-1}$ ;  $G = 30, 20, 20 \text{ s}^{-1}$ ;  $G = 20, 20, 20 \text{ s}^{-1}$   
(variável para cada ensaio, com e sem polímero)

tempo de mistura lenta: 21 minutos (7 minutos cada gradiente)

tempo de decantação ( $T_d$ ): 4, 5,5, 7 e 10 min

características do efluente bruto: 26/07/99

pH: 7,40

turbidez: 205 NTU

absorvância a 666 nm: 0,894

Ensaio 27 –  $G = 50, 30, 20 \text{ s}^{-1}$

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	T <sub>d</sub> =4min		T <sub>d</sub> =5,5min		T <sub>d</sub> =7min		T <sub>d</sub> =10min	
					NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>
1	0	7,68	600	500	24,4	0,033	19,9	0,032	17,0	0,027	15,4	0,024
2	0	7,68	600	500	24,8	0,037	21,8	0,034	14,9	0,024	11,4	0,018
3	0	7,68	600	500	28,0	0,043	22,0	0,034	18,2	0,029	11,7	0,022
4	0	7,68	600	500	27,9	0,039	22,6	0,035	15,1	0,025	12,2	0,020
5	0	7,68	600	500	33,0	0,051	22,9	0,037	17,7	0,028	12,1	0,021
6	0	7,68	600	500	31,9	0,046	24,0	0,037	18,4	0,029	11,9	0,022

Ensaio 28 –  $G = 40, 30, 20 \text{ s}^{-1}$ 

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Td=4min		Td=5,5min		Td=7min		Td=10min	
					NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>
1	0	7,90	600	500	32,1	0,057	30,1	0,050	32,0	0,044	32,9	0,041
2	0	7,90	600	500	30,3	0,055	31,5	0,052	33,5	0,046	31,0	0,042
3	0	7,90	600	500	31,0	0,053	26,3	0,042	30,9	0,042	28,5	0,039
4	0	7,90	600	500	29,7	0,055	26,4	0,046	28,2	0,042	27,0	0,044
5	0	7,90	600	500	30,0	0,060	29,9	0,056	32,6	0,053	29,3	0,046
6	0	7,90	600	500	30,6	0,056	31,4	0,054	34,0	0,051	32,4	0,048

Ensaio 29 –  $G = 30, 20, 20 \text{ s}^{-1}$ 

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Td=4min		Td=5,5min		Td=7min		Td=10min	
					NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>
1	0	7,99	600	500	27,3	0,056	23,9	0,044	21,2	0,031	16,3	0,021
2	0	7,99	600	500	21,7	0,038	20,1	0,037	17,2	0,026	16,9	0,021
3	0	7,99	600	500	27,6	0,052	29,6	0,042	26,2	0,036	23,1	0,029
4	0	7,99	600	500	25,4	0,051	24,5	0,042	23,4	0,033	29,3	0,031
5	0	7,99	600	500	25,8	0,048	24,4	0,040	22,9	0,029	24,7	0,028
6	0	7,99	600	500	28,6	0,049	25,3	0,044	22,6	0,028	24,5	0,028

características do efluente bruto: 28/07/99

pH: 7,49

turbidez: 180 NTU

absorvância a 666 nm: 0,848

Ensaio 30 –  $G = 50, 30, 20 \text{ s}^{-1}$ 

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Td=4min		Td=5,5min		Td=7min		Td=10min	
					NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>
1	0,45	7,09	300	500	21,6	0,048	13,3	0,030	12,5	0,023	7,72	0,016
2	0,45	7,09	300	500	23,2	0,051	12,6	0,030	15,1	0,028	8,47	0,018
3	0,45	7,09	300	500	24,5	0,055	14,0	0,033	13,2	0,028	9,79	0,020
4	0,45	7,09	300	500	23,2	0,053	13,0	0,030	14,5	0,026	8,51	0,021
5	0,45	7,09	300	500	24,5	0,057	13,6	0,030	15,0	0,029	8,62	0,018
6	0,45	7,09	300	500	26,4	0,058	13,6	0,029	13,3	0,026	9,32	0,019



Ensaio 31 –  $G = 40, 30, 20 \text{ s}^{-1}$ 

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Td=4min		Td=5,5min		Td=7min		Td=10min	
					NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>
1	0,45	7,11	300	500	19,7	0,051	13,7	0,033	9,67	0,024	8,23	0,020
2	0,45	7,11	300	500	20,6	0,053	15,4	0,036	11,1	0,026	9,14	0,020
3	0,45	7,11	300	500	18,9	0,044	15,2	0,036	10,8	0,025	8,34	0,019
4	0,45	7,11	300	500	18,3	0,042	13,3	0,031	12,4	0,026	8,98	0,021
5	0,45	7,11	300	500	21,6	0,045	15,4	0,036	11,6	0,027	9,61	0,021
6	0,45	7,11	300	500	17,6	0,039	14,8	0,036	11,2	0,026	6,92	0,019

características do efluente: 29/07/99

pH: 7,51

turbidez: 206 NTU

absorvância a 666 nm: 0,899

Ensaio 32 –  $G = 30, 20, 20 \text{ s}^{-1}$ 

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Td=4min		Td=5,5min		Td=7min		Td=10min	
					NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>
1	0,45	7,12	300	500	12,8	0,030	10,8	0,024	8,44	0,018	8,14	0,020
2	0,45	7,12	300	500	10,7	0,023	7,45	0,017	6,79	0,019	5,35	0,015
3	0,45	7,12	300	500	10,5	0,026	11,0	0,025	7,77	0,019	7,22	0,018
4	0,45	7,12	300	500	7,76	0,017	9,20	0,023	7,58	0,019	6,04	0,015
5	0,45	7,12	300	500	9,66	0,022	12,4	0,027	9,67	0,022	8,33	0,020
6	0,45	7,12	300	500	11,9	0,026	9,36	0,022	8,23	0,019	8,16	0,019

Ensaio 33 –  $G = 20, 20, 20 \text{ s}^{-1}$ 

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Td=4min		Td=5,5min		Td=7min		Td=10min	
					NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>	NTU	Abs <sub>666</sub>
1	0,45	7,19	300	500	17,0	0,035	13,9	0,032	9,91	0,027	8,11	0,021
2	0,45	7,19	300	500	20,3	0,036	11,7	0,024	11,2	0,027	6,91	0,020
3	0,45	7,19	300	500	17,6	0,035	12,3	0,028	12,7	0,029	7,10	0,019
4	0,45	7,19	300	500	16,0	0,033	9,53	0,023	9,56	0,022	5,44	0,015
5	0,45	7,19	300	500	17,0	0,035	11,0	0,024	9,99	0,024	6,86	0,019
6	0,45	7,19	300	500	17,0	0,035	12,5	0,029	11,5	0,027	7,66	0,019

**ANEXO 6** - Resultados das análises relativas aos ensaios de coagulação-floculação do efluente bruto, objetivando avaliar o volume de lodo gerado nos ensaios, e a eficiência final de remoção de cor e turbidez.

**características dos ensaios:**

mistura rápida:  $G = 600 \text{ s}^{-1}$  (sem polímero) e  $G = 1200 \text{ s}^{-1}$  (com polímero)

tempo de mistura rápida: 5 segundos (com e sem polímero)

aplicação de polímero: após a mistura rápida,  $G = 200 \text{ s}^{-1} - 1 \text{ min}$

mistura lenta:  $G = 50, 30 \text{ e } 20 \text{ s}^{-1}$  (sem polímero) e  $G = 30, 20 \text{ e } 20 \text{ s}^{-1}$  (com polímero)

tempo de mistura lenta: 21 minutos (7 minutos cada gradiente)

tempo de decantação (Td): 20 minutos

decantação do lodo: 6 horas em Cone Imhof

características do efluente bruto: **29/07/99**

pH: 7,70

turbidez: 267 NTU

absorvância a 666 nm: 1,056

Ensaio 34

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Grad. G ( $\text{s}^{-1}$ )	Tempo de Mistura Rápida(s)	Td=4 min		Td=7 min	
							Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0	7,79	600	500	600	5	17,6	0,028	12,6	0,021
2	0	7,79	600	500	600	5	17,5	0,030	13,1	0,022
3	0	7,79	600	500	600	5	19,1	0,033	12,3	0,022
4	0	7,79	600	500	600	5	16,8	0,030	10,6	0,017
5	0	7,79	600	500	600	5	19,4	0,033	13,2	0,022
6	0	7,79	600	500	600	5	20,2	0,035	12,8	0,023

características do efluente bruto: 30/07/99

pH: 7,52

turbidez: 249 NTU

absorvância a 666 nm: 0,901

Ensaio 35

Jarro	Dose Pol. (mg/l)	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Grad. G (s <sup>-1</sup> )	Tempo de Mistura Rápida(s)	Td=4 min		Td=7 min	
							Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	0,45	7,40	300	500	1200	5	9,46	0,018	6,10	0,016
2	0,45	7,40	300	500	1200	5	8,21	0,019	5,13	0,016
3	0,45	7,40	300	500	1200	5	5,97	0,015	6,73	0,017
4	0,45	7,40	300	500	1200	5	10,0	0,021	5,64	0,016
5	0,45	7,40	300	500	1200	5	7,94	0,016	6,05	0,013
6	0,45	7,40	300	500	1200	5	10,5	0,024	4,74	0,013

Ensaio 36 – Sedimentação em cone Imhof – sem polímero

Tempo de sediment. (min)	Volume de lodo Cone 1 (ml)	Volume de lodo Cone 2 (ml)	Volume de lodo Cone 3 (ml)	Volume total de lodo (ml)
5	575	525	600	1700
10	475	450	500	1425
15	430	410	430	1270
20	400	380	400	1180
30	350	345	350	1045
45	310	300	300	910
60	280	280	275	835
120	225	224	200	649
180	195	195	175	565
240	175	175	150	500
300	160	160	135	455
360	150	150	130	430
Volume de lodo para 12 litros de efluente decantado				

## Ensaio 37 – Sedimentação em Cone Imhof – com polímero

Tempo de sediment. (min)	Volume de lodo Cone 1 (ml)	Volume de lodo Cone 2 (ml)	Volume total de lodo (ml)
5	1000	960	1960
10	900	860	1760
15	775	750	1525
20	700	680	1380
30	600	580	1180
45	515	500	1015
60	470	450	920
120	320	315	635
180	280	270	550
240	250	240	490
300	225	225	450
360	220	210	430
Volume de lodo para 12 litros de efluente decantado			

**ANEXO 7** – Resultados das análises relativas aos ensaios de ozonização em descontinuo do efluente bruto, objetivando encontrar a concentração de ozônio mais efetiva no tratamento.

### Características dos ensaios

potência do gerador:  $W = 0$

vazão de gás ozônio: 20 l/h

concentração de ozônio aplicada: variável para cada jarro

Características do efluente bruto: **03/08/99**

pH: 7,55

turbidez: 229 NTU

absorvância a 666 nm: 0,878

#### Ensaio 38 – sem polímero

Jarro	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de Ozônio (mg/l)	NTU efl. ozon.	Abs <sub>666</sub> efl. ozon.	Td=4 min		Td=7 min	
							Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	8,74	600	500	2,19	255	0,860	18,8	0,051	13,9	0,036
2	8,74	600	500	3,8	257	0,865	18,9	0,052	14,6	0,38
3	8,74	600	500	5,48	256	0,862	18,0	0,050	14,2	0,044
4	8,74	600	500	8,3	255	0,824	17,4	0,039	12,8	0,032
5	8,74	600	500	9,65	251	0,817	17,7	0,043	13,1	0,032

características do efluente bruto: **04/08/99**

pH: 8,0

turbidez: 229 NTU

absorvância a 666 nm: 0,846

#### Ensaio 39 – sem polímero

Jarro	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de ozônio (mg/l)	NTU efl. ozon.	Abs <sub>666</sub> efl. ozon.	Td=4 min		Td=7 min	
							Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	9,08	600	500	12,0	247	0,817	17,7	0,043	13,0	0,029
2	9,08	600	500	16,6	244	0,795	17,9	0,043	15,0	0,039
3	9,08	600	500	19,46	245	0,720	15,4	0,041	15,3	0,038
4	9,08	600	500	20,18	231	0,656	13,1	0,025	9,73	0,021
5	9,08	600	500	26,66	171	0,546	12,3	0,022	8,23	0,014
6	9,08	600	500	37,74	165	0,328	15,6	0,020	10,1	0,013

características do efluente bruto: 17/08/99

pH: 7,54

turbidez: 172 NTU

absorvância a 666 nm: 0,868

Ensaio 40 – com polímero

Jarro	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de ozônio (mg/l)	NTU efl. ozon.	Abs <sub>666</sub> efl. ozon.	Td=4 min		Td=7 min	
							Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	7,93	300	500	2,28	163	0,824	23,0	0,039	11,9	0,029
2	7,93	300	500	4,33	158	0,733	23,9	0,041	11,5	0,027
3	7,93	300	500	8,78	156	0,707	25,4	0,061	15,6	0,033
4	7,93	300	500	13,11	143	0,351	24	0,053	16,0	0,043
5	7,93	300	500	19,96	137	0,328	20,2	0,044	9,06	0,017

Ensaio 41 – com polímero

Jarro	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de ozônio (mg/l)	Abs <sub>666</sub> efl. ozon.	NTU efl. ozon.	Td=4 min		Td=7 min	
							Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	6,67	300	500	26,98	0,264	127	16,4	0,044	7,64	0,013
2	6,67	300	500	36,86	0,215	113	14,0	0,036	9,47	0,014



**ANEXO 8** – Resultados das análises relativas aos ensaios de ozonização em descontínuo do efluente bruto, nas concentrações 7 e 27 mgO<sub>3</sub>/l, objetivando avaliar a concentração de sulfato.

**Características dos ensaios**

potência do gerador: 10 W

vazão de gás ozônio: 20 l/h

concentração de ozônio aplicada: 7 e 27 mgO<sub>3</sub>/l (variável para cada ensaio)

concentração de sulfato de alumínio: variável para cada jarro

Características do efluente bruto: 18/08/99

pH: 7,80

turbidez: 174 NTU

absorvância a 666 nm: 0,862

**Ensaio 42 – sem polímero**

Jarro	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de ozônio (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
					Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	8,18	600	500	27,0	20,4	0,036	11,8	0,021
2	8,88	600	400	27,0	15,8	0,032	13,1	0,026
3	9,21	600	350	27,0	18,1	0,032	14,7	0,026
4	9,41	600	300	27,0	17,1	0,033	13,2	0,030
5	9,86	600	200	27,0	39,9	0,099	34,2	0,090
6	10,22	600	100	27,0	0159	0,353	131	0,317

**Ensaio 43 – com polímero**

Jarro	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de ozônio (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
					Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	7,05	300	600	27,0	8,56	0,017	5,31	0,009
2	7,52	300	500	27,0	8,83	0,016	5,89	0,012
3	7,77	300	400	27,0	20,4	0,072	16,3	0,031
4	7,93	300	350	27,0	29,8	0,082	21,2	0,044
5	8,23	300	300	27,0	30,3	0,085	24,2	0,071
6	8,69	300	200	27,0	36,9	0,127	33,2	0,115

Características do efluente bruto: 23/08/99

pH: 7,80

turbidez: 185 NTU

absorvância a 666 nm: 0,807

Ensaio 44 – sem polímero

Jarro	pH Coag	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de ozônio (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
					Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
1	8,72	600	500	7,0	6,86	0,015	5,38	0,013
2	8,62	600	400	7,0	8,25	0,032	8,81	0,033
3	8,83	600	350	7,0	12,3	0,057	12,8	0,056
4	9,20	600	300	7,0	19,5	0,085	19,0	0,085
5	8,17	600	200	7,0	39,3	0,186	39,3	0,189

## ANEXO 9 – Condições hidráulicas do piloto.

Coluna 1

Q (l/h)	$v_0$ (cm/min)	E (%)	$\varepsilon$	G ( $s^{-1}$ )	$\Delta h$ (mm)
122	0,0120	0,061	0,416	32,468	71
134	0,0132	1,110	0,441	32,318	-
170	0,0167	1,234	0,497	34,177	64
230	0,0226	1,410	0,560	39,348	63
255	0,0251	1,632	0,610	36,551	71

Coluna 2

Q (l/h)	$v_0$ (cm/min)	E (%)	$\varepsilon$	G ( $s^{-1}$ )	$\Delta h$ (mm)
122	0,0102	0,043	0,406	26,077	61
134	0,0112	1,058	0,414	28,438	-
170	0,0142	1,209	0,487	27,140	44
230	0,0192	1,380	0,551	31,030	43
255	0,0211	1,522	0,593	29,906	60

Coluna 3

Q (l/h)	$v_0$ (cm/min)	E (%)	$\varepsilon$	G ( $s^{-1}$ )	$\Delta h$ (mm)
122	0,0088	0,009	0,385	22,823	59
134	0,0097	1,035	0,401	23,746	-
170	0,0123	1,120	0,446	26,121	57
230	0,0166	1,257	0,507	29,744	61
255	0,0185	1,342	0,538	29,894	64

Onde: Q = vazão;  $v_0$  = velocidade de aproximação; E = expansão;  $\varepsilon$  = porosidade;  
G = gradiente de velocidade;  $\Delta h$  = perda de carga.

**ANEXO 10 – Resultados das análises relativas aos ensaios no piloto de floculação para o efluente bruto com polímero e sem polímero.**

**Características dos ensaios**

vazão de efluente no piloto: 170 l/h (com polímero) e 230 l/h (sem polímero)

vazão bomba de sulfato: 28,3 ml/min (com polímero) e 38,8 ml/min (sem polímero)

vazão bomba polímero: 1,275 ml/min

decantação em descontinuo: 4 e 7 min

características do efluente bruto: 01/10/99

pH: 7,68

turbidez: 300 NTU

absorvância a 666 nm: 1,086

Ensaio 48

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	600	500	0,0	40,8	0,084	25,8	0,063
40	600	500	0,0	24,0	0,061	14,2	0,039
60	600	500	0,0	32,1	0,080	15,1	0,040
80	600	500	0,0	35,4	0,094	15,5	0,043
100	600	500	0,0	39,5	0,104	15,1	0,043
120	600	500	0,0	34,3	0,089	18,0	0,051

características do efluente bruto: 07/10/99

pH: 7,82

turbidez: 197

absorvância a 666 nm: 0,820

Ensaio 49

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	300	500	0,45	43,3	0,125	30,5	0,090
40	300	500	0,45	38,4	0,092	25,2	0,062
60	300	500	0,45	32,9	0,080	22,2	0,052
80	300	500	0,45	33,4	0,080	23,2	0,056
100	300	500	0,45	25,6	0,057	19,1	0,042
120	300	500	0,45	26,3	0,055	20,7	0,044
140	300	500	0,45	26,8	0,056	18,9	0,040

características do efluente bruto: 08/10/99

pH: 7,71

turbidez: 259 NTU

absorvância a 666 nm: 1,090

Ensaio 50

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	600	500	0,0	43,1	0,099	33,7	0,074
40	600	500	0,0	36,5	0,086	29,1	0,072
60	600	500	0,0	39,0	0,098	28,3	0,074
80	600	500	0,0	43,2	0,104	31,2	0,078
100	600	500	0,0	38,7	0,090	26,2	0,064
120	600	500	0,0	32,7	0,076	22,0	0,054
140	600	500	0,0	23,5	0,044	16,5	0,038

características do efluente bruto: 26/10/99

pH: 7,86

turbidez: 308 NTU

absorvância a 666 nm: 1,332

Ensaio 51

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	600	500	0,0	20,6	0,042	14,7	0,036
40	600	500	0,0	16,0	0,033	10,7	0,023
60	600	500	0,0	15,4	0,033	10,1	0,022
80	600	500	0,0	15,0	0,031	9,91	0,022
100	600	500	0,0	15,6	0,033	9,20	0,021

características do efluente bruto: 29/10/99

pH: 7,67

turbidez: 246 NTU

absorvância a 666 nm: 1,325

Ensaio 52

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	300	500	0,45	40,0	0,113	22,6	0,063
40	300	500	0,45	20,0	0,055	14,1	0,041
60	300	500	0,45	21,9	0,060	14,1	0,045
80	300	500	0,45	19,9	0,056	13,0	0,038
100	300	500	0,45	20,6	0,056	13,8	0,039
120	300	500	0,45	20,1	0,056	13,6	0,036
140	300	500	0,45	21,6	0,060	12,9	0,037



características do efluente bruto: 03/11/99

pH: 7,76

turbidez: 336 NTU

absorvância a 666 nm: 1,341

#### Ensaio 53

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	600	500	0,0	29,8	0,054	21,7	0,036
40	600	500	0,0	9,96	0,023	6,16	0,019
60	600	500	0,0	10,7	0,025	6,25	0,018
80	600	500	0,0	11,0	0,024	7,9	0,018
100	600	500	0,0	12,1	0,025	6,71	0,018
120	600	500	0,0	10,3	0,024	6,60	0,019
140	600	500	0,0	12,4	0,034	7,08	0,022
160	600	500	0,0	12,3	0,030	6,85	0,018

#### Ensaio 54

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	600	500	0,0	12,7	0,028	10,7	0,026
40	600	500	0,0	12,8	0,026	7,44	0,016
60	600	500	0,0	12,0	0,024	5,62	0,012
80	600	500	0,0	12,8	0,031	7,03	0,016
100	600	500	0,0	12,1	0,027	6,70	0,016
120	600	500	0,0	12,4	0,027	6,31	0,014

#### Ensaio 55

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	300	500	0,45	32	0,076	23,0	0,057
40	300	500	0,45	24	0,051	15,2	0,032
60	300	500	0,45	23,5	0,049	13,7	0,030
80	300	500	0,45	30,7	0,072	20,0	0,044
100	300	500	0,45	19,2	0,040	12,7	0,029
120	300	500	0,45	22,1	0,047	13,7	0,030

**ANEXO 11** – Resultados das análises relativas aos ensaios no piloto de floculação para o efluente ozonizado à 7mg/l, com polímero e sem polímero.

### Características dos ensaios

vazão de efluente no piloto: 170 l/h (com polímero) e 230 l/h (sem polímero)

vazão bomba de sulfato: 28,3 ml/min (com polímero) e 38,3 ml/min (sem polímero)

vazão bomba polímero: 1,275 ml/min

decantação em descontinuo: 4 e 7 min

características do efluente bruto: 06/10/99

pH: 7,42

turbidez: 228 NTU

absorvância a 666 nm: 0,865

### Ensaio 56

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	600	500	0,0	32,9	0,094	26,3	0,071
40	600	500	0,0	25,1	0,062	14,9	0,040
60	600	500	0,0	26,4	0,066	15,8	0,043
80	600	500	0,0	23,6	0,057	13,5	0,035
100	600	500	0,0	26,7	0,064	14,7	0,057
120	600	500	0,0	26,8	0,062	14,1	0,037
140	600	500	0,0	19,9	0,051	13,9	0,035

### Ensaio 57

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	300	500	0,45	34,0	0,087	22,8	0,065
40	300	500	0,45	26,3	0,070	17,5	0,046
60	300	500	0,45	24,7	0,065	15,9	0,042
80	300	500	0,45	15,9	0,063	14,6	0,039
100	300	500	0,45	20,7	0,054	14,5	0,038
120	300	500	0,45	26,6	0,074	16,0	0,043

características do efluente bruto: 28/10/99

pH: 7,69

turbidez: 245 NTU

absorvância a 666 nm: 1,267

Ensaio 58

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	600	500	0,0	18,3	0,038	10,9	0,027
40	600	500	0,0	19,3	0,034	14,3	0,026
60	600	500	0,0	24,0	0,059	8,38	0,019
80	600	500	0,0	23,8	0,059	8,66	0,021

Ensaio 59

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	300	500	0,45	40,8	0,096	32,0	0,072
40	300	500	0,45	24,1	0,061	15,0	0,039
60	300	500	0,45	26,2	0,065	15,8	0,038
80	300	500	0,45	17,9	0,042	10,6	0,028

características do efluente bruto: 28/10/99

pH: 7,67

turbidez: 263

absorvância a 666 nm: 1,153

Ensaio 60

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	600	500	0,0	16,5	0,036	8,78	0,018
40	600	500	0,0	18,1	0,039	8,71	0,020
60	600	500	0,0	17,4	0,035	9,89	0,022
80	600	500	0,0	16,0	0,034	9,63	0,020
100	600	500	0,0	17,3	0,037	9,19	0,019

## Ensaio 61

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	300	500	0,45	42,7	0,103	32,1	0,078
40	300	500	0,45	29,1	0,074	20,9	0,054
60	300	500	0,45	29,5	0,068	20,5	0,050
80	300	500	0,45	30,3	0,075	21,6	0,054
100	300	500	0,45	33,3	0,084	25,4	0,066
120	300	500	0,45	29,4	0,076	23,4	0,059
140	300	500	0,45	33,8	0,085	21,8	0,060

**ANEXO 12** – Resultados das análises relativas aos ensaios no piloto de floculação para o efluente ozonizado à 27mg/l, com polímero e sem polímero.

### Características dos ensaios

vazão entrada no piloto: 170 l/h (com polímero) e 230 l/h (sem polímero)

vazão bomba de sulfato: 28,3 ml/min (com polímero) e 38,8 ml/min (sem polímero)

vazão bomba polímero: 1,275 ml/min

decantação em descontinuo: 4 e 7 min

características do efluente bruto: 18/11/99

pH: 7,36

turbidez: 242 NTU

absorvância a 666 nm: 1,371

Ensaio 62

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	600	500	0,0	25,6	0,079	23,3	0,070
40	600	500	0,0	16,2	0,043	10,6	0,030
60	600	500	0,0	14,2	0,039	9,99	0,028
80	600	500	0,0	15,5	0,042	9,08	0,025
100	600	500	0,0	14,4	0,036	7,96	0,023
120	600	500	0,0	15,2	0,038	8,11	0,023
140	600	500	0,0	15,7	0,036	7,81	20,21

Ensaio 63

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	300	500	0,45	23,3	0,058	17,8	0,042
40	300	500	0,45	23,8	0,059	16,2	0,044
60	300	500	0,45	20,2	0,046	13,7	0,033
80	300	500	0,45	19,4	0,045	11,0	0,026
100	300	500	0,45	20,0	0,048	16,5	0,039
120	300	500	0,45	21,6	0,058	15,9	0,040
140	300	500	0,45	21,0	0,052	15,9	0,038

**ANEXO 13** – Resultados das análises relativas aos ensaios no piloto de floculação para o efluente tratado biologicamente, pré-ozonizado à 7mg/l.

**Características dos ensaios**

vazão de efluente no piloto: 134 l/h (com polímero) e 230 l/h (sem polímero)

vazão bomba de sulfato: 22,3 ml/min (com polímero) e 38,3 ml/min (sem polímero)

vazão bomba polímero: 1,005 ml/min

decantação em descontinuo: 4 e 7 min

características do efluente pré-ozonizado e tratado biologicamente: 01/10/99

pH: 7,90

turbidez: 376 NTU

absorvância a 666 nm: 0,831

Ensaio 64

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	300	500	0,45	41,9	0,087	23,4	0,062
40	300	500	0,45	39,0	0,099	22,8	0,067
60	300	500	0,45	26,1	0,075	17,4	0,052
80	300	500	0,45	30,7	0,081	15,2	0,045
100	300	500	0,45	29,4	0,079	17,6	0,052
120	300	500	0,45	32,8	0,087	17,9	0,052
140	300	500	0,45	30,6	0,080	18,1	0,050
160	300	500	0,45	37,7	0,095	18,4	0,052
180	300	500	0,45	32,5	0,084	15,7	0,045



características do efluente pré-ozonizado e tratado biologicamente: 04/10/99

pH: 7,72

turbidez: 309

absorvância a 666 nm: 0,913

Ensaio 65

Tempo (min)	Dose de cal (mg/l)	Dose S.A. (mg/l)	Dose de polímero (mg/l)	Td=4 min		Td=7 min	
				Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>	Turbidez (NTU)	Abs <sub>666</sub>
20	600	500	0,0	34,6	0,084	16,5	0,046
40	600	500	0,0	17,4	0,063	14,0	0,043
60	600	500	0,0	22,9	0,065	14,4	0,046
80	600	500	0,0	25,7	0,064	15,3	0,046
100	600	500	0,0	24,4	0,064	17,2	0,052
120	600	500	0,0	27,5	0,068	20,1	0,054
140	600	500	0,0	26,8	0,065	20,2	0,056

**ANEXO 14** – Resultados das análises relativas aos ensaios de pós-ozonização do efluente decantado (em descontinuo), objetivando a melhor concentração de ozônio.

**Características dos ensaios**

potência do gerador: 10 W

vazão de gás ozônio: 20 l/h

concentração de ozônio aplicada: variável para cada jarro

dose de sulfato de alumínio: 500 mg/l

dose de cal: 600 mg/l (sem polímero) e 300 mg/l (com polímero)

dose de polímero: 0,45 mg/l

características do efluente bruto: **20/12/99**

pH: 7,52

turbidez: 249 NTU

absorvância a 666 nm: 1,056

**Ensaio 66 – sem polímero**

amostra	efl. decantado 7min		dose de ozônio (mg/l)	efl. pós-ozonizado	
	turbidez	Abs <sub>666</sub>		turbidez	Abs <sub>666</sub>
1	12,4	0,021	1,53	11,9	0,023
2	12,4	0,021	2,0	9,75	0,020
3	12,4	0,021	4,0	8,49	0,021
4	12,4	0,021	6,5	6,72	0,017
5	12,4	0,021	8,6	8,93	0,022
6	12,4	0,021	27	6,46	0,008

**Ensaio 67 – com polímero**

amostra	efl. decantado 7min		dose de ozônio (mg/l)	efl. pós-ozonizado	
	turbidez	Abs <sub>666</sub>		turbidez	Abs <sub>666</sub>
1	5,73	0,015	1,64	6,12	0,012
2	5,73	0,015	2,0	5,93	0,011
3	5,73	0,015	3,0	4,93	0,009
4	5,73	0,015	4,7	4,98	0,010
5	5,73	0,015	7,0	4,08	0,08
6	5,73	0,015	8,0	6,19	0,011
7	5,73	0,015	27	4,51	0,006