

✓

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE FLOCULAÇÃO NA  
EFICIÊNCIA DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO DE  
ALTA TAXA APLICADA AO TRATAMENTO DE ÁGUA  
DE ABASTECIMENTO**

**SOLANGE APARECIDA GOULARTE DOMBROSKI**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Hidráulica e Saneamento.

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali**

DEDALUS - Acervo - EESC



31100016558



**São Carlos**

**1996**

Class. TESE  
Curt. 0397  
Tombo T02697

Hidráulica e Saneamento

st 0746617

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

D667i

Dombroski, Solange Aparecida Goularte  
Influência das condições de floculação na eficiência da flotação por ar dissolvido de alta taxa aplicada ao tratamento de água de abastecimento / Solange Aparecida Goularte Dombroski. -- São Carlos, 1996.

Dissertação (Mestrado). -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1996.  
Área: Hidráulica e Saneamento  
Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali

1. Flotação por ar dissolvido.
  2. Tempo de floculação.
  3. Gradiente de velocidade médio de floculação.
  4. Número de compartimentos de floculação.
- I. Título

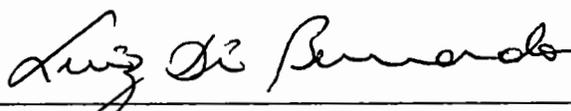
## FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 22-11-1996  
pela Comissão Julgadora:



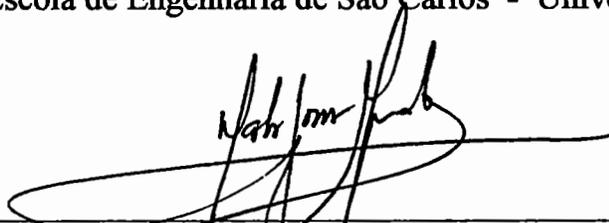
---

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



---

Prof. Tit. **LUIZ DI BERNARDO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



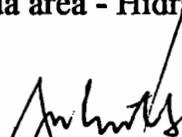
---

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



---

Prof. Dr. **EDUARDO CLETO PIRES**  
Coordenador da área - Hidráulica e Saneamento



---

**JOSE CARLOS A. CINTRA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*Aos meus pais, Antonio Goularte e Helena Walter  
Goularte, pelo maravilhoso exemplo de vida.*

*A Jeferson Luiz D. Dombroski, meu marido,  
companheiro e melhor amigo.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Marco Antonio Penalva Reali, pela valiosa orientação no decorrer deste trabalho.

A Giovana, Felipe, Solange, Belém, João Bosco, Carolina, Maria Lida, pela amizade.

A Margarida pelo companheirismo e apoio à realização de parte dos ensaios.

Aos técnicos do Laboratório de Saneamento, Paulo, Júlio, Miguel, *in memoriam*, e Cidinha, pela atenção e colaboração.

Ao técnico Francisco Carlos Bergamini, pela grande participação na montagem e manutenção das instalações utilizadas.

Ao técnico do Laboratório de Fenômenos de Transporte, Vagner, pela montagem, manutenção e empréstimo de materiais eletromecânicos.

Aos ex-professores, pela participação em minha formação.

A CAPES, pela bolsa de mestrado, e a FAPESP, pelo auxílio financeiro para aquisição de materiais e equipamentos.

A Jeferson, pelo constante estímulo e apoio.

Aos meus irmãos, Laercio, Arnaldo e Sidnei pelo importante apoio em cada etapa de minha vida.

**SUMÁRIO**

<b>LISTA DE QUADROS</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS</b>	<b>xvi</b>
<b>RESUMO</b>	<b>xviii</b>
<b><i>ABSTRACT</i></b>	<b>xix</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>4</b>
3.1 Fundamentos da coagulação	4
3.1.1 Mecanismos da coagulação	6
a) Compressão da dupla camada	6
b) Adsorção e neutralização de cargas	8
c) Varredura	9
d) Adsorção e formação de pontes	9
3.1.2 Coagulação com sulfato de alumínio	10
a) Diagrama de Coagulação	11
3.2 Aspectos da floculação	15
3.2.1 Interações entre partículas	16
3.2.2 Gradiente de velocidade médio e relação com tempo de floculação	18
3.3 Flotação por ar dissolvido (FAD)	25
3.3.1 Fundamentos gerais da flotação por ar dissolvido	27
a) Mecanismos de flotação	28
b) Principais fatores que afetam a flotação por ar dissolvido	29
c) Utilização de placas em unidades de flotação por ar dissolvido	31

3.3.2 Aplicação da flotação por ar dissolvido no tratamento de água de abastecimento	33
3.3.3 Influência da coagulação e floculação no desempenho da flotação por ar dissolvido	37
a) Coagulação	37
b) Floculação	39
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>44</b>
4.1 Considerações iniciais	44
4.2 Descrição das instalações	46
4.2.1 Descrição do reator estático de floculação-flotação por ar dissolvido (flotatestes)	46
4.2.2 Descrição da instalação com escoamento contínuo de coagulação-floculação-flotação por ar dissolvido de alta taxa	49
4.2.3 Outros equipamentos empregados	59
4.3 Águas de estudo	60
4.3.1 Água de estudo tipo I	60
4.3.2 Água de estudo tipo II	62
4.4 Correlação entre valores de cor e absorvância	63
4.5 Produtos químicos utilizados	64
4.6 Ensaios realizados com o reator estático de floculação-flotação por ar dissolvido (flotatestes) e a água tipo I	65
4.6.1 Procedimento e monitoramento dos ensaios	65
4.6.2 Ensaios visando a otimização da dosagem de coagulante e pH de coagulação	68
4.6.3 Construção das curvas de flotação	68
4.6.4 Ensaios visando a otimização da quantidade de ar fornecida	69
4.6.5 Ensaios visando a otimização do tempo e do gradiente de velocidade médio de mistura rápida	69
4.6.6 Ensaios visando a otimização do tempo e do gradiente de velocidade médio da floculação	69
4.6.7 Ensaios visando avaliação da influência do escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação na eficiência da flotação	70
4.7 Ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo e água tipo I	72
4.7.1 Procedimento e monitoramento realizados na instalação com escoamento contínuo	74

4.8 Ensaio realizado com o reator estático de floculação-flotação por ar dissolvido (flotatestes) e a água tipo II	79
4.8.1 Procedimento e monitoramento dos ensaios	80
4.9 Ensaio realizado na instalação com escoamento contínuo e água tipo II	82
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>85</b>
5.1 Curvas de correlação entre valores de cor e absorvância	85
5.2 Resultados dos ensaios realizados utilizando-se o reator estático de floculação-flotação por ar dissolvido (flotatestes) e a água tipo I	86
5.2.1 Otimização da dosagem de coagulante e pH de coagulação, utilizando-se o equipamento de flotatestes e água tipo I	86
5.2.2 Otimização da quantidade de ar fornecida, em ensaios realizados com o equipamento de flotatestes e água tipo I	110
5.2.3 Otimização do tempo e do gradiente de velocidade médio de mistura rápida, utilizando-se o equipamento de flotatestes e água tipo I	117
5.2.4 Otimização do tempo e do gradiente de velocidade médio de floculação em ensaios realizados com o equipamento de flotatestes e água tipo I	122
5.2.5 Redução gradual do gradiente de velocidade médio de floculação estudada em ensaios realizados com o equipamento de flotatestes e água tipo I	129
5.3 Resultados dos ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo para a água tipo I	133
5.4 Analogia entre os resultados obtidos no flotatestes com os resultados obtidos na instalação com escoamento contínuo para a água tipo I	163
5.5 Resultados dos ensaios realizados com o reator estático de floculação-flotação por ar dissolvido (flotatestes) e a água tipo II	166
5.6 Resultados dos ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo para a água tipo II	180
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>188</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>193</b>
<b>APÊNDICES</b>	

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Características da água do poço e da água de estudo tipo I	62
QUADRO 2 - Características da água do poço e da água de estudo tipo II	63
QUADRO 3 - Escalonamentos do gradiente de velocidade médio de floculação para 3 e 2 câmaras de floculação definidos a partir da metodologia proposta por PÁDUA (1994) considerando cor aparente e turbidez remanescentes e dois valores de velocidade de flotação	71
QUADRO 4 - Ensaio programados com a instalação com escoamento contínuo para a água tipo I	73
QUADRO 5 - Resumo dos resultados obtidos durante os ensaios realizados no flotatestes para a otimização da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação, utilizando-se a água tipo I	87
QUADRO 6 - Resumo dos resultados obtidos durante a otimização da quantidade de ar fornecida à flotação, a partir da variação da fração de recirculação em ensaios realizados com o equipamento de flotatestes e água tipo I	111
QUADRO 7 - Valores ótimos de gradiente de velocidade médio e tempo de mistura rápida com respectivos valores de eficiência de remoção de cor aparente e turbidez para $V_f = 21,8$ cm/min e $V_f = 13,3$ cm/min. Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I	118
QUADRO 8 - Gradiente de velocidade médio de floculação ótimo ( $G_{f_{ot}}$ ) para cada tempo de floculação estudado e respectivos valores de eficiência de remoção de cor aparente e turbidez para $V_f = 21$ cm/min e $V_f = 10,4$ cm/min. Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I	123

- QUADRO 9 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo para a água tipo I 135
- QUADRO 10 - Resultados obtidos utilizando-se o equipamento de flotateste para  $V_f = 21 \text{ cm/min}$  ( $\cong 302 \text{ m/d}$ ), e resultados obtidos em ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo, com TAS aparente na câmara de flotação  $\cong 360 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$  ( $V_{\text{placas}} \cong 31 \text{ cm/min} \cong 446 \text{ m/d}$ ), com a água tipo I 164
- QUADRO 11 - Condições ótimas de coagulação e respectivos valores de eficiência de remoção (%) de cor aparente e turbidez obtidos para clarificação por flotação e sedimentação da água tipo II 167
- QUADRO 12 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo para a água tipo II 181

**LISTA DE FIGURAS**

- FIGURA 1 - Diagrama de coagulação do sulfato de alumínio para remoção de cor. Concentração inicial de ácido húmico de 4 mg/L (100 uC) e 20 mg/L (450 uC) com turbidez de zero. (Fonte: AMIRTHARAJAH & O'MELIA, 1990) 13
- FIGURA 2 - Diagrama de coagulação do sulfato de alumínio e sua relação com o potencial zeta (Fonte: AMIRTHARAJAH & O'MELIA, 1990) 15
- FIGURA 3 - Fotografia do reator estático de floculação-flotação por ar dissolvido (flotateste) 47
- FIGURA 4 - Esquema geral do flotateste 48
- FIGURA 5 - Esquema geral da instalação com escoamento contínuo de coagulação-floculação-flotação por ar dissolvido de alta taxa 52
- FIGURA 6 - Dimensões das unidades de floculação e flotação da instalação com escoamento contínuo 53
- FIGURA 6 (Cont.) - Dimensões das unidades de floculação e flotação da instalação com escoamento contínuo 54
- FIGURA 7 - Esquema da câmara de saturação 55
- FIGURA 8 - Injetor com 6 orifícios usado para dispersar a solução de coagulante na água bruta 55
- FIGURA 9 - Fotografia apresentando uma vista parcial da instalação com escoamento contínuo 56
- FIGURA 10 - Fotografia da unidade de floculação da instalação com escoamento contínuo 56
- FIGURA 11 - Fotografia da vista lateral da câmara de flotação 57
- FIGURA 12 - Fotografia dos aquecedores elétricos instalados na tubulação à montante da unidade de mistura rápida 57

- FIGURA 13 - Fotografia da câmara de saturação e medidor da vazão de recirculação 58
- FIGURA 14 - Fotografia do medidor da vazão afluyente à instalação com escoamento contínuo, instalado à montante da unidade de floculação e fotografia dos conversores eletromagnéticos de vazão 58
- FIGURA 15 - Fotografia dos reservatórios de preparação e armazenamento da água de estudo 59
- FIGURA 16 - Fotografia do equipamento utilizado para promover a mistura rápida dos ensaios realizados no reator estático, potenciômetro e turbidímetro 60
- FIGURA 17 - Fluxograma das etapas de ensaios realizados com o flotateste para a água tipo I 66
- FIGURA 18 - Esquema da quantidade de ar fornecida para a flotação,  $Sp \cdot p$  76
- FIGURA 19 - Fluxograma dos ensaios realizados com o flotateste para a água tipo II 81
- FIGURA 20 - Esquema dos ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo para a água tipo II 84
- FIGURA 21 - Correlação entre valores de cor aparente e absorbância para pH= 6, pH= 7 e pH= 8 85
- FIGURAS 22 a 41 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio de 10, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 e 70 mg/L (água tipo I) 90 a 99
- FIGURAS 42 a 61 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0$ ) em função da velocidade de

- flotação para dosagem de sulfato de alumínio de 10, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 e 70 mg/L (água tipo I) 100 a 109
- FIGURAS 62 a 67 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0$ ) em função da velocidade de flotação para fração de recirculação de 2%, 4%, 6%, 8%, 10% e 12%, em volume (água tipo I) 113 a 115
- FIGURA 68 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0$ ) em função da velocidade de flotação para fração de recirculação (R) de 2%, 4%, 6%, 8%, 10% e 12%, em volume (água tipo I) 116
- FIGURAS 69 a 74 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do tempo de mistura rápida para gradiente de velocidade médio de mistura rápida de  $600 \text{ s}^{-1}$ ,  $700 \text{ s}^{-1}$ ,  $800 \text{ s}^{-1}$ ,  $900 \text{ s}^{-1}$ ,  $1000 \text{ s}^{-1}$  e  $1100 \text{ s}^{-1}$  (água tipo I) 119 a 121
- FIGURAS 75 a 82 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do gradiente de velocidade médio de floculação para tempo de floculação de 2 min, 4 min, 8 min, 12 min, 16 min, 20 min, 24 min e 30 min (água tipo I) 125 a 128
- FIGURAS 83 e 84 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação para tempo de floculação de 24 min e 12 min (água tipo I) 132
- FIGURAS 85 a 106 - Resultados obtidos durante as carreiras de operação 1 a 22 da instalação com escoamento contínuo em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I 141 a 162

- FIGURAS 107 a 120 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio de 20, 25, 30, 40, 50, 60 e 70 mg/L (água tipo II) 171 a 177
- FIGURA 121 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0$ ) em função da velocidade de flotação e velocidade de sedimentação para diferentes valores de dosagem de sulfato de alumínio (água tipo II) 178
- FIGURAS 122 e 123 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio de 30 mg/L e 70 mg/L, variando-se a fração de recirculação (água tipo II) 179
- FIGURAS 124 a 127 - Resultados obtidos durante as carreiras de operação 1 a 4 da instalação com escoamento contínuo em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo II 184 a 187

**LISTA DE TABELAS**

- TABELA 1 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático em função da variação da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação (água tipo I) Apêndice 1
- TABELA 2 - Cor aparente remanescente (C/C0) e turbidez remanescente (T/T0) obtidas em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático em função da variação da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação (água tipo I) Apêndice 1
- TABELA 3 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático em função da variação da fração de recirculação e velocidade de flotação (água tipo I) Apêndice 1
- TABELA 4 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático em função da variação do gradiente de velocidade médio de mistura rápida e tempo de mistura rápida (água tipo I) Apêndice 1
- TABELA 5 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático em função da variação do tempo de floculação e gradiente de velocidade médio de floculação (água tipo I) Apêndice 1
- TABELA 6 - Resultados obtidos, em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático, em função da variação do escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação para tempo de floculação de 24 e 12 min (água tipo I) Apêndice 1

- TABELAS 7 a 28 - Resumo dos resultados obtidos durante as carreiras de operação 1 a 22 da instalação com escoamento contínuo (água tipo I) Apêndice 2b
- TABELA 29 - Resultados obtidos, em ensaios de coagulação-floculação-flotação e coagulação-floculação-sedimentação, realizados no reator estático, em função da variação da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação (água tipo II) Apêndice 3
- TABELA 30 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação-floculação-flotação e coagulação-floculação-sedimentação realizados no reator estático em função da variação da velocidade de flotação e velocidade de sedimentação, para diferentes valores de dosagem de sulfato de alumínio com seus respectivos valores ótimos de pH de coagulação (água tipo II) Apêndice 3
- TABELA 31 - Resultados obtidos, em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático, em função da variação da fração de recirculação e velocidade de flotação, para dosagem de sulfato de alumínio de 30 mg/L e 70 mg/L, com seus respectivos valores ótimos de pH de coagulação (água tipo II) Apêndice 3
- TABELAS 32 a 35 - Resumo dos resultados obtidos durante as carreiras de operação 1 a 4 da instalação com escoamento contínuo (água tipo II) Apêndice 4b

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

- $A_{\text{frontal}}$  - área frontal entre as placas na câmara de flotação, perpendicular à inclinação das mesmas ( $L^2$ )
- $A_{\text{placas}}$  - área em planta entre as placas na câmara de flotação ( $L^2$ )
- DSA - dosagem de sulfato de alumínio ( $ML^{-3}$ )
- $d$  - diâmetro da partícula ( $L$ )
- FAD - flotação por ar dissolvido
- $G^*$  - gradiente de velocidade médio ótimo ( $T^{-1}$ )
- $G'$  - gradiente de velocidade médio mínimo ( $T^{-1}$ )
- $G_f$  - gradiente de velocidade médio de floculação ( $T^{-1}$ )
- $G_{f_{\text{ót}}}$  - gradiente de velocidade médio ótimo de floculação ( $T^{-1}$ )
- $G_m$  - gradiente de velocidade médio ( $T^{-1}$ )
- $G_{mr}$  - gradiente de velocidade médio na mistura rápida ( $T^{-1}$ )
- $K_A$  - constante de agregação
- $K_B$  - constante de ruptura ( $T$ )
- $m$  - número de compartimentos de mistura completa em série
- MON - matéria orgânica natural
- $N$  - turbidez residual ( $uT$ )
- $n$  - turbidez do sobrenadante em reator de batelada após sedimentação "infinita" ( $uT$ )
- $n_1^0$  - número de partículas primárias por unidade de volume que entram no reator
- $n_1^m$  - número de partículas primárias por unidade de volume que saem do  $m$ -ésimo reator
- $P_d$  - potência dissipada ( $ML^2T^{-3}$ )
- $P$  - pressão na câmara de saturação ( $ML^{-1}T^{-2}$ )
- $p$  - vazão de recirculação ( $L^3T^{-1}$ )
- pie - ponto isoelétrico
- $Q_{af}$  - vazão afluyente à instalação com escoamento contínuo ( $L^3T^{-1}$ )
- $Q_{\text{recir.}}$  - vazão de recirculação ( $L^3T^{-1}$ )

- R - taxa de recirculação (%)
- Rey - número de Reynolds
- Rh - raio hidráulico (L)
- Sp\*p - quantidade de ar fornecida ( $\text{ML}^{-3}$ )
- TAS<sub>ap</sub> - taxa de aplicação superficial aparente ( $\text{L}^3\text{L}^{-2}\text{T}^{-1}$ )
- Td - tempo de detenção (T)
- Tf - tempo de floculação (T)
- Tmr - tempo de mistura rápida (T)
- V - volume do reator ( $\text{L}^3$ )
- Vf - velocidade de flotação ( $\text{LT}^{-1}$ )
- V<sub>placas</sub> - velocidade de escoamento entre as placas ( $\text{LT}^{-1}$ )
- Vs - velocidade de sedimentação ( $\text{LT}^{-1}$ )
- $\eta$  - microescala de Kolmogoroff (L)
- $\mu$  - viscosidade absoluta da água ( $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$ )
- $\nu$  - viscosidade cinemática da água ( $\text{L}^2\text{T}^{-1}$ )

## RESUMO

DOMBROSKI, S. A. G. (1996). *Influência das condições de floculação na eficiência da flotação por ar dissolvido de alta taxa aplicada ao tratamento de água de abastecimento*. São Carlos. 199p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A floculação é uma operação que influencia marcadamente na eficiência da flotação de águas de abastecimento. As condições de floculação requeridas pela flotação mostram-se diferentes daquelas geralmente assumidas pela sedimentação, já que, em cada método a remoção ocorre de maneira diferente. Aspectos fundamentais da floculação, tais como tempo, gradiente de velocidade médio, combinações de gradiente de velocidade médio e número de compartimentos foram estudados empregando-se unidades de flotação por ar dissolvido estática e com escoamento contínuo utilizando-se água tipo I, preparada de forma a apresentar cor aparente em torno de 100 uC e turbidez em torno de 6 uT. Além disso, comparou-se resultados obtidos em ensaios de clarificação por flotação e por sedimentação realizados no reator estático, utilizando-se água tipo II, preparada de maneira a apresentar cor aparente em torno de 260 uC e turbidez em torno de 5 uT. Combinações de gradiente de velocidade médio na floculação foram estudadas utilizando-se a instalação com escoamento contínuo e água tipo II. A flotação por ar dissolvido apresentou bom desempenho para a clarificação de ambos tipos de água estudados. Os resultados com o reator estático e água tipo I comprovaram a importância da otimização de parâmetros de floculação como tempo, gradiente de velocidade médio e escalonamento do gradiente de velocidade médio. Com resultados obtidos empregando-se a instalação com escoamento contínuo e água tipo I comprovou-se que o escalonamento de gradiente de velocidade médio na floculação é mais significativo na eficiência do processo para tempos de floculação menores.

Palavras-chave: flotação por ar dissolvido, tempo de floculação, gradiente de velocidade médio de floculação, número de compartimentos de floculação.

**ABSTRACT**

DOMBROSKI, S. A. G. (1996). *Influence of flocculation conditions in high rate dissolved air flotation efficiency when applied to drinking water treatment*. São Carlos. 199p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Flocculation is one of the main unit operation affecting drinking water flotation efficiency. The flocculation conditions required by flotation are different from those usually required by sedimentation, since in each method the removal occurs in a different way. Some fundamental aspects of flocculation were studied, such as time, root mean square, root mean square combinations and number of flocculation chambers by using a batch flotation unit and a continuous flow flotation plant, treating type I water, prepared to present an apparent color of approximately 100 CU and turbidity of 6 NTU. Besides that, essays of clarification by flotation and by sedimentation were executed in the batch unit and were compared, using type II water, prepared to present 260 CU of apparent color and turbidity about 5 NTU. Some combinations of the root mean square were studied using the continuous flow plant and type II water. Dissolved air flotation presented a good performance for the clarification of both types of studied water. The results obtained with the batch unit and type I water proved the importance of optimizing parameters like time, root mean square, and root mean square scaling. The results obtained with the continuous flow plant and type I water showed that scaling the root mean square is more significative for the process efficiency for shorter flocculation times.

Key-words: dissolved air flotation, flocculation time, flocculation root mean square, number of flocculation chambers.

## 1 INTRODUÇÃO

A flotação por ar dissolvido é um método de separação de fases no qual são utilizadas microbolhas de ar, as quais aderem às partículas ou flocos, aumentando seu empuxo e conduzindo-os à superfície. No tratamento de água para abastecimento, a flotação por ar dissolvido vem sendo estudada e aplicada como uma etapa de clarificação de determinados tipos de águas, cujos flocos formados após coagulação e floculação, com o uso de sais de alumínio principalmente, apresentam baixa velocidade de sedimentação ou mesmo tendência a flotar.

Segundo a literatura, a flotação por ar dissolvido está sendo utilizada no tratamento de água para abastecimento desde a década de 60. Sua viabilidade tem sido comprovada por diversas aplicações práticas em escala real e pesquisas em reatores estáticos e de escoamento contínuo. Em 1971 existiam 71 estações em operação utilizando a flotação por ar dissolvido para a clarificação de água na Finlândia, Noruega e Suécia, sendo que 55 eram utilizadas em indústrias e 16 no abastecimento de água (HYDE et al., 1977).

No início dos anos 70, o Water Research Centre de Medmenham, Inglaterra, fez um detalhado estudo de viabilidade desse processo e seus resultados demonstraram sua eficiência para tratar águas com alto teor de algas ou água com alta cor (LONGHURST & GRAHAM, 1987). EDZWALD et al. (1992) comentam que a flotação por ar dissolvido tem sido usada por mais de 20 anos na Europa e tem tornado-se o método de clarificação preferido em muitos países como Inglaterra, Bélgica e Holanda e nos países Escandinavos. Ainda de acordo com EDZWALD et al. (1992), existiam aproximadamente 7 estações de flotação por ar dissolvido na América do Norte, porém, devido às suas vantagens, a flotação por ar dissolvido está recebendo crescente atenção. Na Holanda, a primeira estação com flotação por ar

dissolvido foi construída em 1979, sendo que atualmente 7 estações estão em operação (PUFFELEN et al., 1995). Em 1969 a flotação por ar dissolvido foi aplicada como parte do tratamento de água para abastecimento pela primeira vez na África do Sul (OFFRINGA, 1995). Na Finlândia, existem 36 estações que produzem água potável usando a flotação por ar dissolvido como parte do processo de tratamento, sendo a primeira estação construída em 1965 (HEINÄNEN et al., 1995). Nos Estados Unidos, de acordo com NICKOLS et al. (1995), a primeira estação utilizando flotação por ar dissolvido foi posta em operação em 1993 na cidade de New Castle, New York.

No Brasil, a aplicação da flotação por ar dissolvido como etapa do tratamento de água para abastecimento começou a ser estudada a partir da década de 80 pelo Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, sendo que uns dos primeiros trabalhos é apresentado por REALI (1984). Em 1994, foram implantadas na Estação de Tratamento de Água de Meaípe-ES, duas unidades de flotação por ar dissolvido em escala real (LOBATO et al., 1995).

Alguns dos fatores que influenciam a eficiência da flotação por ar dissolvido são coagulação, floculação (tempo, grau de agitação e modo como é produzida a agitação), quantidade de ar fornecida, dispositivos de liberação de ar e remoção de lodo (GREGORY & ZABEL, 1990) além da qualidade da água bruta. Pesquisas relacionadas a cada parâmetro que pode influenciar a flotação por ar dissolvido, mostram-se de grande importância para otimização global do processo.

Nos últimos anos, a floculação precedendo a flotação por ar dissolvido vem sendo estudada por alguns pesquisadores já que apresenta importância destacada pelo fato de que a flotação por ar dissolvido requer condições de floculação diferentes daquelas adotadas quando se tem a sedimentação. Assim, o presente trabalho se reveste de grande importância, pois sua proposta envolveu o estudo de alguns aspectos fundamentais da floculação visando a flotação de água com cor elevada e baixa turbidez, tais como, tempo e gradiente de velocidade médio, número de compartimentos e combinações de gradientes de velocidade médios que conduzam a melhores desempenhos de unidades de flotação por ar dissolvido.

## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho teve os seguintes objetivos:

- Verificar a influência do tempo, gradiente de velocidade médio e número de compartimentos da unidade de floculação na eficiência de um reator estático de floculação e flotação por ar dissolvido e de uma unidade com escoamento contínuo de coagulação, floculação e flotação por ar dissolvido de alta taxa;

- Investigar a potencialidade de estudos realizados no reator estático de flotação por ar dissolvido para determinar parâmetros de projeto que possam ser utilizados em unidades com escoamento contínuo.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Fundamentos da coagulação

CAMP (1955) comenta que no tratamento de água para abastecimento, efluentes sanitários e industriais, um importante processo, conhecido como floculação ou coagulação, é a formação de flocos suspensos os quais podem ser removidos efetivamente do líquido por sedimentação e filtração. Para JOHNSON & AMIRTHARAJAH (1983), coagulação é o termo usado para descrever a agregação de partículas muito pequenas, geralmente de tamanho coloidal, freqüentemente encontradas no tratamento de água para abastecimento e água residuária.

De acordo com AMIRTHARAJAH & O'MELIA (1990), termos como coagulação e floculação tem diferentes significados para diferentes pessoas. Tais autores consideram que a coagulação abrange todas as reações, mecanismos e resultados no processo como um todo de agregação de partículas dentro da água que está sendo tratada, incluindo formação de coagulante *in situ* (onde aplicado), desestabilização química das partículas e contato físico entre partículas. Usualmente, o processo de coagulação é alcançado com dois tipos de tanques arranjados em série: tanques de mistura rápida para adição do coagulante, formação do coagulante *in situ* e desestabilização das partículas; e tanques de floculação para promover contato entre partículas. Ainda segundo estes autores, o estágio físico de produzir contatos é denominado de floculação.

DI BERNARDO (1993) apresenta esse tema de maneira bastante clara, mencionando a coagulação como resultado de dois fenômenos: o primeiro essencialmente químico e o segundo fundamentalmente físico. O fenômeno químico

consiste nas reações do coagulante com a água e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva e depende da concentração do metal e pH final da mistura. O fenômeno físico consiste no transporte das espécies hidrolisadas para que haja contato com as impurezas presentes na água. Após a coagulação, há necessidade de agitação relativamente lenta com o objetivo de proporcionar encontros e transformar partículas menores em agregados maiores ou flocos, sendo esta etapa denominada floculação.

A coagulação é praticada em grande número de estações de tratamento de água e é uma etapa essencial do processo de separação sólido-líquido. O uso de coagulantes químicos, por muitas estações de tratamento, serve a diversos propósitos, tais como: desestabilizar partículas sólidas (particulados), remover cor orgânica e precursores de trihalometanos (THM), melhorar a floculação através do uso de auxiliar de coagulação, melhorar a filtração (AWWA, 1989). Nos últimos quinze anos, segundo a mesma fonte, a coagulação tornou-se uma parte importante da estratégia da indústria de tratamento de água para controle de THMs, isto é, remover os precursores de THM e minimizar a formação de THMs.

A coagulação é um processo bastante complexo e como tal é afetada por vários fatores tais como: dosagem do coagulante; pH; concentração coloidal, freqüentemente medida por turbidez; carbono orgânico total (COT) e carbono orgânico dissolvido (COD) ou cor; ânions ou cátions em solução; efeitos de mistura; mobilidade eletroforética ou potencial zeta, temperatura (AMIRTHARAJAH & O'MELIA, 1990), tamanho e distribuição de tamanhos das partículas em estado coloidal e em suspensão (DI BERNARDO, 1993).

Segundo O'MELIA (1972), há muito tempo observou-se que as partículas coloidais sólidas em um meio aquoso movem-se em um campo elétrico, indicando que as mesmas apresentam carga elétrica. Partículas coloidais (por exemplo, argila, bactéria, proteínas, entre outras) podem desenvolver carga elétrica. O sinal da carga primária pode ser negativo ou positivo, embora a maioria dos colóides em água apresente carga negativa. O sinal e magnitude da carga primária são freqüentemente afetados pelo pH e concentração de íons da fase aquosa. Porém, uma dispersão coloidal (fases sólida e aquosa juntas) não tem uma carga elétrica líquida, de forma

que as cargas primárias sobre as partículas devem ser contrabalançadas na fase aquosa resultando em uma dupla camada elétrica a cada interface entre os sólidos e a água. As forças de difusão e atração eletrostática espalham as cargas na água em volta de cada partícula em uma camada difusa. As forças repulsivas e as forças atrativas de van der Waals interagem entre as partículas na solução, produzindo uma barreira potencial que impede a agregação e caracterizando a estabilidade da partícula. O processo de superação da barreira repulsiva e possibilidade de ocorrência da agregação é chamado de coagulação. São reconhecidos quatro mecanismos distintos de coagulação, os quais serão mencionados a seguir.

### **3.1.1 Mecanismos da coagulação**

A desestabilização das partículas pode ser obtida através de quatro mecanismos de coagulação: (a) compressão da dupla camada, (b) adsorção e neutralização de carga, (c) varredura e (d) adsorção e formação de pontes. Diferentes coagulantes químicos podem ocasionar a desestabilização de suspensões de diferentes formas.

#### **a) Compressão da dupla camada**

As interações de alguns coagulantes com uma partícula coloidal são puramente eletrostáticas, íons de carga similar à carga primária dos colóides são repelidos e íons de carga contrária são atraídos. Nenhuma outra interação é significativa. Os coagulantes que agem dessa forma limitada são denominados eletrólitos indiferentes. Em 1900, Hardy e Schulze observaram os efeitos desses coagulantes em experimentos de laboratório e, segundo eles, a desestabilização de um colóide por um eletrólito indiferente é ocasionada por íons de carga oposta a carga dos colóides e a eficácia da coagulação desses íons aumenta com a carga. Por exemplo, as concentrações de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  necessárias para desestabilizar um colóide carregado negativamente variam, aproximadamente, na razão de  $1:10^{-2}:10^{-3}$ . A desestabilização por íons contrários é alcançada pela compressão da camada difusa em volta do colóide. Altas concentrações de eletrólitos na solução resulta em

concentrações altas de íons contrários na camada difusa. O volume necessário da camada difusa para manter eletroneutralidade é diminuído e conseqüentemente é reduzida a espessura da camada difusa. A faixa da interação repulsiva entre partículas coloidais similares diminui e a barreira de energia a ser vencida pode desaparecer (O'MELIA, 1972).

ARBOLEDA VALENCIA (1992), comentando sobre a coagulação por compressão da dupla camada, menciona que aumentando a concentração do eletrólito, íons contrários incorporam-se a camada difusa, ocasionando a diminuição da magnitude das forças repulsivas e permitindo a eliminação da barreira de energia. Assim, a adição de eletrólito indiferente não muda o potencial do colóide, porém, altera a curva das forças repulsivas, diminuindo a distância em que estas são efetivas. A redução da espessura da dupla camada é mais importante que a redução do potencial zeta até o ponto isoelétrico. Potencial zeta é o potencial que existe no plano que separa a seção da camada que se move com a partícula (plano de cisalhamento) do restante da dispersão, formando parte integral da partícula e, está situado em algum ponto entre a superfície interna e a superfície externa da dupla camada. A adsorção de íons contrários pode ser um fenômeno eletrostático ou químico. Se o fenômeno for puramente eletrostático e íons contrários forem agregados à camada difusa, os íons com cargas menores poderão se aproximar mais da superfície da partícula e não se fixarão a pontos de adsorção mas, flutuarão ao seu redor. Neste caso:

- a) a coagulação se produz quando o potencial zeta chega a zero;
- b) o excesso de coagulantes agregados não pode produzir estabilização da suspensão, pois os colóides não podem adsorver mais íons contrários do que sua carga primária permite;
- c) quanto maior for a carga do íon contrário mais será diminuída a carga do colóide de acordo com a lei de Schulze-Hardy.

Como os produtos da hidrólise do Al (III) e Fe (III) apresentam cargas desde +5 até -1, a quantidade de coagulante que deve ser agregado a uma suspensão

dependerá mais da carga dos produtos de hidrólise que se formam do que do número de partículas na suspensão.

AMIRTHARAJAH & O'MELIA (1990) comentam que um bom exemplo desse mecanismo de coagulação ocorre quando partículas em água de rios, com baixa força iônica, misturam-se com água do mar de elevada força iônica. Isso causa a desestabilização das partículas por compressão da dupla camada e o acúmulo de partículas resulta na formação de depósitos nas desembocaduras dos rios.

#### **b) Adsorção e neutralização de cargas**

Segundo STUMM & O'MELIA (1968), espécies adsorvíveis desestabilizam colóides à concentrações muito menores do que íons não adsorvíveis. A capacidade de uma espécie de ser adsorvida é refletida na concentração necessária para produzir agregação. A adsorção de uma molécula de soluto sobre a superfície de um sólido pode envolver a remoção da molécula de soluto da solução, remoção do solvente da superfície sólida e aderência do soluto à superfície do sólido. Então, a energia resultante da interação por adsorção é uma função composta de interações da superfície sólida-solvente-soluto. A atração da superfície para o adsorvato pode resultar de interações químicas, tais como, pontes de hidrogênio, reações de coordenação, ligações covalentes e reações de troca iônica além dos efeitos eletrostáticos. Para alguns solutos a atração do sólido pode ser de menor intensidade comparando-a à repulsão ou atração da fase aquosa.

Outras características desse mecanismo de desestabilização, ainda segundo STUMM & O'MELIA (1968), são: i) pode haver reestabilização dos colóides, usualmente acompanhada por reversão de carga, através da adição de concentrações altas de espécies adsorvíveis; ii) existe uma proporcionalidade linear direta entre a dosagem necessária de coagulante e a área superficial do colóide, sendo que para caracterizar tal comportamento, os referidos autores usaram o termo relação estequiométrica.

DI BERNARDO (1993) comenta que o mecanismo de adsorção e neutralização de carga é muito importante quando o tratamento é realizado através de

uma das tecnologias da filtração direta, pois não há necessidade de produção de flocos para posterior sedimentação mas, de partículas desestabilizadas as quais serão retidas no meio filtrante.

### c) Varredura

Quando um sal metálico tal como sulfato de alumínio ou cloreto férrico é adicionado à água em concentrações suficientemente altas para causar precipitação de um hidróxido metálico (por exemplo,  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{p})$  ou  $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{p})$ ), partículas coloidais podem ser incorporadas nesses precipitados durante sua formação e também colidir com os mesmos. Tal processo foi denominado por PACKHMAN<sup>1</sup> apud AMIRTHARAJAH & O'MELIA (1990) de coagulação por varredura. A formação de precipitados depende da quantidade de sal adicionada, do pH e da concentração de algumas espécies de íons presentes na solução (MENDES, 1989).

O'MELIA (1972), comenta que as partículas coloidais podem servir como núcleos para a formação dos precipitados tal que a taxa de precipitação aumenta com o aumento da concentração das partículas coloidais a serem removidas. Isso pode resultar em uma relação inversa entre a dosagem ótima de coagulante e a concentração de material a ser removido.

O mecanismo de varredura é intensamente utilizado nas estações de tratamento em que se tem a floculação e sedimentação antecedendo a filtração, pois os flocos resultantes são de maior tamanho e apresentam velocidades de sedimentação relativamente altas, se comparadas aos flocos obtidos com a coagulação realizada no mecanismo de adsorção-neutralização (DI BERNARDO, 1993).

### d) Adsorção e formação de pontes

Esse mecanismo de desestabilização é alcançado com o uso de polímeros sintéticos ou naturais, isto é, macromoléculas que apresentam sítios ionizáveis ao

---

<sup>1</sup> PACKHMAN, R. F. (1965). Some studies of the coagulation of dispersed clays with hydrolyzing salts. *Jour. Colloid Interface Science*, v.20, p. 81 apud AMIRTHARAJAH, A., O'MELIA, C. R. (1990). *Coagulation processes: destabilization, mixing, and flocculation*. In: AWWA, *Water quality and treatment: a handbook of community water supplies*. 4th ed. United States, McGraw-Hill, Inc. Chapter 6, p.269-365.

longo de sua cadeia. Em função dos tipos de sítios ionizáveis que os polímeros apresentam, DI BERNARDO (1993) comenta que estes podem ser classificados como catiônico, aniônico, não iônico e anfótero.

STUMM & O'MELIA (1968) mencionam que polímeros sintéticos e naturais tem sido usados com sucesso como agentes agregantes no tratamento de água e esgoto e para condicionamento de lodo.

A desestabilização por formação de pontes, de acordo com AMIRTHARAJAH & O'MELIA (1990), ocorre quando segmentos de um polímero são adsorvidos em mais de uma partícula, dessa forma ligando-as. Quando uma molécula de polímero entra em contato com uma partícula coloidal, alguns grupos reativos do polímero adsorvem à superfície da partícula, deixando outras porções da molécula estendidas na solução. Caso uma segunda partícula com alguns sítios de adsorção livres entre em contato com os "laços" e "caudas" estendidos, poderá ocorrer aderência. Um agregado partícula-polímero-partícula é formado no qual o polímero serve como uma ponte. A formação de ponte efetiva requer que polímeros adsorvidos prolonguem-se a uma distância suficiente, a partir da superfície da partícula para aderir à outras partículas, e também que esteja disponível alguma superfície livre para adsorção dos segmentos estendidos. Se polímero em excesso for adicionado e adsorvido, as partículas são reestabilizadas pela saturação da superfície.

### 3.1.2 Coagulação com sulfato de alumínio

Sais de alumínio (III) e ferro (III) são os produtos químicos mais comuns usados no tratamento de água, sendo, provavelmente, o sulfato de alumínio o mais amplamente usado (HAMANN et al., 1990). ARBOLEDA VALENCIA (1992), comenta que os sais de alumínio mais conhecidos são o sulfato de alumínio, sulfato de alumínio amoniacal e cloreto de polialumínio. Este autor comenta ainda que o sulfato de alumínio é o mais freqüentemente usado nas estações de tratamento de água devido ao baixo custo e manuseio relativamente simples.

Com relação à química em solução aquosa do alumínio (III), AMIRTHARAJAH & MILLS (1982), mencionam que esta é complexa e diversa

devido aos numerosos intermediários da hidrólise formados antes da precipitação do hidróxido de alumínio,  $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ . Contudo, trabalhos extensivos de pesquisadores elucidaram razoavelmente bem as espécies da hidrólise do alumínio (III) e suas interações com colóides que causam coagulação e reestabilização. Quando sais de alumínio são dissolvidos na água, o íon metálico  $\text{Al}^{+3}$  hidrata, coordenando seis moléculas de água e formando um íon aquametálico,  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$ . Então, o íon aquametálico pode reagir e formar diversas espécies da hidrólise.

Ainda segundo AMIRTHARAJAH & MILLS (1982), aceitando o fato da existência dessas espécies da hidrólise do Al (III), segue-se duas importantes deduções. Primeiro, tem sido mostrado que os hidroxocomplexos metálicos são adsorvidos nas superfícies e podem causar a reversão de carga dessas superfícies. Segundo, as reações seqüenciais da hidrólise liberam íons  $\text{H}^+$ , abaixando o pH da solução nas quais eles são formados, além disso, a concentração das diversas espécies da hidrólise será controlada pela concentração final de íons  $\text{H}^+$ , isto é, pelo pH.

O efeito dos hidroxocomplexos na solubilidade é mais convenientemente ilustrado usando-se um diagrama de log da concentração versus pH (pC-pH), ou seja, diagrama de solubilidade. DI BERNARDO (1993), comenta que trabalhos de diversos investigadores contribuíram para que, na década de oitenta, Amirtharajah propusesse uma forma mais simples de estudar a coagulação, com base nos diagramas de solubilidade do alumínio e ferro, a qual tem sido intensamente utilizada por DI BERNARDO e colaboradores para obtenção de parâmetros da coagulação necessários ao projeto de novas estações, reformas e ampliação de estações existentes.

#### **a) Diagrama de Coagulação**

Os diagramas de coagulação são ferramentas úteis para prever as condições químicas sob as quais ocorre a coagulação. Os diagramas tem sido usados para definir a dosagem de coagulante e condições de pH para: 1) remoção de turbidez, 2) remoção de cor, 3) filtração direta e 4) seleção de dispositivos para mistura rápida. O esquema dos diagramas associa condições químicas específicas com diferentes mecanismos de coagulação, assim, os diagramas são também valiosos guias para

planejar, analisar e interpretar estudos em estações piloto e *jar tests* (AMIRTHARAJAH & O'MELIA, 1990).

De acordo com AMIRTHARAJAH (1989), o diagrama de coagulação do sulfato de alumínio é desenvolvido a partir do diagrama de estabilidade termodinâmica (diagrama pC-pH) para a fase sólida do hidróxido de alumínio.

### *. Remoção de cor*

As fontes de cor na água podem incluir íons metálicos naturais (ferro e manganês), ácidos húmico e fúlvico e efluentes industriais. A presença de turbidez aumenta a cor aparente mas não a cor verdadeira (TATE & ARNOLD, 1990).

Os materiais orgânicos encontrados em águas naturais são, na maioria das vezes, substâncias húmicas, isto é, ácido húmico, ácido fúlvico e huminas. Sob as condições de pH da maioria das águas naturais, as substâncias húmicas apresentam-se como macromoléculas carregadas negativamente (EDWARDS & AMIRTHARAJAH, 1985). Segundo ARBOLEDA VALENCIA (1992), sabe-se que as substâncias húmicas contém, basicamente, carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio em porcentagens variáveis e mostram propriedades ácidas com pesos moleculares desde 200 até mais de 50000; sendo classificadas em quatro frações: ácido fúlvico, ácido húmico, ácido himatomelânico e humina.

EDWARDS & AMIRTHARAJAH (1985) comentam que os materiais orgânicos, na forma de substâncias húmicas, são indesejáveis no abastecimento de água por diversas razões, desde estética até por serem precursores de trihalometanos potencialmente carcinogênicos. Para estes autores, a coagulação com sulfato de alumínio, um procedimento padrão para remover sólidos suspensos, também é um método efetivo para remover cor orgânica.

Na figura 1 é mostrado um diagrama de coagulação do sulfato de alumínio para remoção de cor. Nesta figura são mostradas regiões onde ocorre remoção efetiva de cor para duas concentrações iniciais de ácido húmico. Para a concentração de 4 mg/L de ácido húmico ou 100 uC, são definidas duas regiões distintas de remoção de cor. Essas regiões podem ser associadas com dois mecanismos de remoção. Na faixa



remoção dessas frações de baixo peso molecular (AMIRTHARAJAH & O'MELIA, 1990).

### *Remoção de turbidez*

A turbidez na água é causada pela presença de matéria suspensa, tal como, argila, silte, matéria orgânica e inorgânica finamente dividida, plâncton e outros organismos microscópicos. Os particulados podem ser de significante importância para a saúde, desde que, certos materiais tóxicos podem estar contidos ou serem adsorvidos nos mesmos; como microrganismos patogênicos, metais pesados entre outros (TATE & ARNOLD, 1990).

A figura 2 apresenta um diagrama de coagulação do sulfato de alumínio para remoção de turbidez. Segundo AMIRTHARAJAH & O'MELIA (1990), para o desenvolvimento do diagrama de coagulação do sulfato de alumínio, os principais resultados de coagulação de diversos pesquisadores foram plotados em um único diagrama de  $\log [Al]$  em moles por litro versus pH da solução e, este, sobreposto ao diagrama de solubilidade termodinâmica. Com base nestes e outros dados, AMIRTHARAJAH & MILLS (1982) desenvolveram o diagrama mostrado na figura 2.

A coagulação ocorre quando espécies solúveis da hidrólise ou hidróxido de alumínio sólido interagem com partículas coloidais. A interação entre o colóide e o hidróxido de alumínio e a relação do potencial zeta ao diagrama de coagulação são mostrados na parte inferior da figura 2. O ponto isoelétrico (pie) para o hidróxido de alumínio está na faixa de pH de 7 a 9, dependendo dos íons presentes na solução, freqüentemente os ânions. Os dados apresentados na figura 2 foram baseados supondo que o ponto isoelétrico do hidróxido de alumínio seja 8. A interação do hidróxido de alumínio carregado positivamente com os colóides carregados negativamente, produz dois pontos de potencial zeta igual a zero, a valores de pH de 4,8 e 6,8 (pontos A e B da figura 2). Em ambas condições de pH pode-se esperar boas condições de coagulação. Entre esses dois valores, o colóide coberto é reestabilizado devido a adsorção em excesso de espécies carregadas positivamente (AMIRTHARAJAH & O'MELIA, 1990).

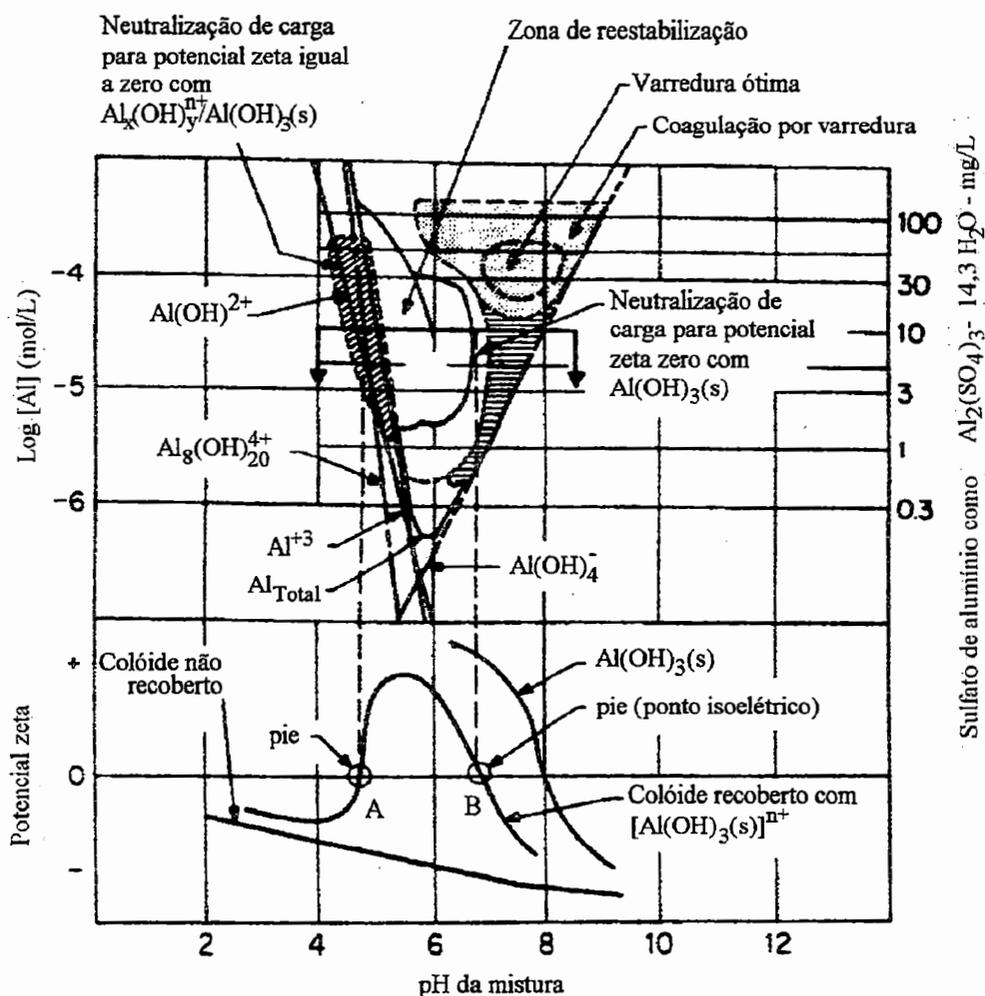


FIGURA 2 - Diagrama de coagulação do sulfato de alumínio e sua relação com o potencial zeta (Fonte: AMIRTHARAJAH & O'MELIA, 1990)

### 3.2 Aspectos da floculação

A floculação é o estágio de agregação de partículas desestabilizadas para formação de flocos (ARGAMAN, 1971). De acordo com HARRIS et al. (1966), o objetivo da construção de floculadores em estações de tratamento de água é promover o crescimento dos agregados a tamanho e densidade tais, de modo que ocorra máxima separação nas etapas subsequentes da estação ou, conforme O'MELIA (1972) comenta, promover contatos entre partículas.

A floculação tem sido analisada como sendo resultado de colisões entre partículas em três mecanismos, os quais serão mencionados brevemente a seguir.

### 3.2.1 Interações entre partículas

As colisões entre partículas suspensas ocorrem por três processos de transporte distintos: difusão Browniana ou floculação pericinética, gradiente de velocidade ou floculação ortocinética e sedimentação diferencial. Na floculação pericinética, um movimento arbitrário das partículas é causado por bombardeio das moléculas de água, o que pode ocasionar contatos entre as partículas. A floculação ortocinética produz gradientes de velocidade em escoamento laminar ou turbulento, promovendo contatos entre partículas. A sedimentação diferencial produz transporte vertical de partículas resultando em colisões (AMIRTHARAJAH & O'MELIA, 1990).

ARGAMAN (1971) comenta que a maioria dos estudos de cinética de floculação foram baseados na equação proposta por Smoluchowski em 1918 (SMOLUCHOWSKI<sup>1</sup> apud ARGAMAN 1971) para a estimativa da frequência de colisões entre partículas suspensas em escoamento laminar, a qual foi generalizada por Camp e Stein (CAMP & STEIN<sup>2</sup> apud ARGAMAN 1971) para adequar à condições turbulentas. O'MELIA (1972) cita diversos pesquisadores (Camp e Stein, 1943; Camp, 1955; Hudson, 1965; e Hudson e Wolfner, 1967) que tem desenvolvido a teoria de Smoluchowski para aplicação em projeto de unidades de floculação em tratamento de água e água residuária. Outros trabalhos importantes (O'Melia, 1980; Spielman, 1978 e Tambo e Watanabe, 1979) são citados por AMIRTHARAJAH & TRUSLER (1986) ao comentarem que nos últimos 10 anos tem sido desenvolvido um conhecimento razoável do processo da floculação a nível microscópico.

---

<sup>1</sup> SMOLUCHOWSKI, M. (1918). Versuch einer mathematischen theorie der koagulations kinetik kolloid losungen. *Z. Physik Chem.*, 92:155 apud ARGAMAN, Y. A. (1971). *Pilot-plant studies of flocculation. Journal AWWA*, p.775-777. Dec.

<sup>2</sup> CAMP, T. R., STEIN, P. C. (1943). Velocity gradients and internal work in fluid motion. *Jour. Boston Soc. Civ. Engrs.*, 30:219 apud ARGAMAN, Y. A. (1971). *Pilot-plant studies of flocculation. Journal AWWA*, p.775-777. Dec.

A agitação promovida na água, tanto na mistura rápida quanto na floculação, causa um movimento turbulento. Tal movimento turbulento pode ser relacionado como a superposição de turbilhões de tamanhos decrescentes (McCONNACHIE, 1991). HINZE<sup>1</sup> apud DI BERNARDO (1993) definiu o escoamento turbulento como uma condição irregular de escoamento, no qual as grandezas físicas (velocidade, pressão etc.) apresentam variações aleatórias com o tempo e coordenadas espaciais; assim, estatisticamente, os valores resultantes não coincidem com os valores das referidas grandezas físicas.

Aos turbilhões produzidos pela turbulência, pode-se relacionar uma escala denominada escala de turbulência, definida como a distância até a qual um aglomerado de partículas em um fluido se desloca no sentido perpendicular a direção do escoamento sem perder sua identidade. De acordo com o tamanho das escalas de turbilhões, pode predominar no escoamento, forças viscosas ou forças inerciais, sendo o campo turbulento classificado em subfaixa viscosa e subfaixa inercial. A diferenciação entre as subfaixas é dada pela chamada microescala de Kolmogoroff ( $\eta$ ), a qual é definida como a menor escala de escoamento puramente turbulento que pode existir antes que o turbilhão se converta em calor (ARBOLEDA VALENCIA, 1992).

AMIRTHARAJAH & TRUSLER (1986) analisaram a desestabilização de partículas durante a coagulação baseados na colisão entre as partículas coloidais e os turbilhões do tamanho da microescala de Kolmogoroff, assumindo que estes transportam as espécies da hidrólise carregadas positivamente. A teoria desenvolvida pelos referidos autores, prevê que ocorre uma desestabilização mínima para razões de  $\eta/d$  igual a 2 para subfaixa viscosa e de 1,33 para subfaixa inercial em escoamento turbulento, onde  $\eta$  é o tamanho da microescala e  $d$  é o diâmetro da partícula.

Dentro de uma unidade de floculação ocorrem simultaneamente dois fenômenos opostos. Por um lado, partículas são removidas da suspensão sendo

---

<sup>1</sup> HINZE, J. O. (1975). *Turbulence*. McGraw-Hill, New York apud DI BERNARDO, L. (1993). *Métodos e técnicas de tratamento de água*. Rio de Janeiro, ABES, v.1.

incorporadas em flocos e por outro lado, partículas primárias são liberadas na suspensão devido a ruptura de flocos pré formados (ARGAMAN, 1971).

Segundo AMIRTHARAJAH & O'MELIA (1990), as colisões entre partículas causam a formação dos flocos e essa ação é acelerada com aumento do gradiente de velocidade. Entretanto, se a agitação for muito vigorosa, as forças de cisalhamento causam a ruptura dos flocos. Assim, ainda segundo estes autores, é necessário que a análise global da cinética da floculação combine os fenômenos de agregação e ruptura, para uma descrição realística do processo, tanto quanto, para uma determinação da distribuição do tamanho dos flocos; já que em todas as aplicações práticas de floculação, o regime hidrodinâmico é turbulento.

AMIRTHARAJAH & O'MELIA (1990) comentam que os principais mecanismos de ruptura de flocos normalmente aceitos são: (i) erosão superficial dos flocos e (ii) ruptura dos flocos. Intuitivamente é possível perceber que os fenômenos simultâneos de agregação e ruptura resultarão em um tamanho estável de floco.

### OK 3.2.2 Gradiente de velocidade médio e relação com tempo de floculação

O gradiente de velocidade médio em qualquer sistema depende da energia que é dissipada na água (O'MELIA, 1972). A eq.(1) foi apresentada por Camp e Stein em 1943:

$$Gm = \sqrt{\frac{P_d}{V\mu}} \quad (1)$$

Em que:

Gm: gradiente de velocidade médio ( $T^{-1}$ )

$P_d$ : potência dissipada ( $ML^2T^{-3}$ )

V: volume do reator ( $L^3$ )

$\mu$ : viscosidade absoluta da água ( $ML^{-1}T^{-1}$ )

Os gradientes de velocidade, a qualquer instante, de um ponto a outro de uma câmara de mistura variam consideravelmente em magnitude, sendo maior nas extremidades das paletas ou outros dispositivos usados para promover mistura e sendo menor nos pontos mais distantes ao ponto de introdução de turbulência. Contudo, sob condições estáveis de entrada de trabalho, existe um gradiente de velocidade médio ( $G_m$ ) que corresponde ao valor médio da taxa de dissipação de energia por toda a câmara (CAMP, 1955).

No entanto, críticas foram direcionadas ao uso da eq.(1) por alguns autores (CLEASBY, 1984; RICHTER, 1986; CLARK<sup>1</sup> apud McCONNACHIE, 1991; ARBOLEDA VALENCIA, 1992).

Com o objetivo de questionar a validade da equação de Camp e Stein usada como um parâmetro de projeto de instalações de floculação com escoamento turbulento, CLEASBY (1984) revisou e analisou a literatura relacionada ao fenômeno de turbulência, energia requerida em mistura turbulenta, modelagem de floculação turbulenta, configuração de agitadores e o impacto da temperatura sobre a floculação, concluindo que:

(i)  $G_m$  é um parâmetro válido somente para a floculação de partículas menores do que a microescala de Kolmogoroff, o que não é típico na prática de floculação de água e água residuária; (ii)  $G_m$  pode ser um parâmetro apropriado para mistura rápida de curta duração (menos do que 30 s), durante a qual ocorre, na fase inicial, a agregação de partículas menores do que a microescala; (iii) a entrada de energia por unidade de massa elevado a  $2/3$ ,  $\epsilon^{2/3}$ , é um parâmetro de floculação mais apropriado do que  $G_m$  para a prática de floculação de água e água residuária, devido aos vórtices turbulentos que promovem a floculação, serem maiores do que a microescala de Kolmogoroff; (iv) na região de floculação com vórtices turbulentos, a configuração do agitador pode influenciar na eficiência da floculação tanto quanto  $\epsilon^{2/3}$ , principalmente para baixos números de Reynolds, os quais são típicos na prática.

---

<sup>1</sup> CLARK, M. M. (1985). Critique of Camp and Stein's RMS velocity gradient. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, v.111, n.6, p.741-754 apud McCONNACHIE, G. L. (1991). Turbulence intensity of mixing in relation to flocculation. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, v.117, n.6, p.731-750, Nov/Dec.

Assim, a configuração do agitador deve ser avaliada de modo a proporcionar a melhor floculação para determinada energia de entrada; (v) na região de floculação com vórtices turbulentos, a eficiência da floculação é independente da temperatura.

A equação de Camp e Stein, deduzida para condições de escoamento laminar, é ainda a ferramenta mais útil no cálculo dos floculadores e dos sistemas de veiculação de água floculada, apesar de RICHTER<sup>1</sup> apud RICHTER(1986) e SNEL & ARBOLEDA VALENCIA<sup>2</sup> apud RICHTER(1986), demonstrarem que o parâmetro Gm como demonstrado por Camp e Stein, perde muito de seu sentido físico para os floculadores reais, que, via de regra, tem escoamento turbulento (RICHTER, 1986).

Para ARBOLEDA VALENCIA (1992), na prática, Gm, apresentado por Camp e Stein, é o único parâmetro de projeto para floculadores reais. Contudo, segundo este autor, nos escoamentos tridimensionais e turbulentos como ocorrem em todo floculador real, o valor de Gm não tem relação direta com o gradiente de velocidade laminar ( $du/dy$ ), nem com a frequência das colisões pois ignora a escala de turbulência.

Em um trabalho de avaliação da intensidade de turbulência do fluido e velocidades locais de um ponto a outro em um reator quadrado de 1 L, em relação a eficiência da floculação, McCONNACHIE (1991) conclui, entre outras coisas, que para diversas configurações de agitadores, a intensidade de turbulência e em menor extensão, a velocidade média total dentro de um reator, são válidos como parâmetro para prever o desempenho do floculador.

CAMP (1955) discute a relação entre Gm e tempo de floculação (Tf): como a taxa de formação de flocos é diretamente proporcional ao Gm, resulta que para maiores magnitudes de Gm, os tempos requeridos para formação dos flocos seriam

<sup>1</sup> RICHTER, C. A. (1981). **Fundamentos teóricos da floculação em meio granular.** Revista ENGENHARIA, São Paulo apud RICHTER, C. A. (1986). *Sistemas de floculação acelerada.* Revista DAE, v.45, n.145, p.149-155, jun.

<sup>2</sup> SNEL, H., ARBOLEDA VALENCIA, J. (1982). **Influencia de la escala de la turbulencia en el proceso de floculación del agua.** Separata da Revista ACODAL, Bogotá, Colômbia, Dez. apud RICHTER, C. A. (1986). *Sistemas de floculação acelerada.* Revista DAE, v.45, n.145, p.149-155, jun.

menores. Assim, para economizar em unidades de floculação, os valores de  $Gm$  deveriam ser tão grandes quanto praticáveis, considerando que quanto maior  $Gm$ , maiores serão as forças de cisalhamento. O limite prático de  $Gm$  para qualquer processo de floculação é determinado pelo tamanho dos flocos requeridos, sendo que existe um tamanho máximo do floco associado com cada  $Gm$ . Uma floculação satisfatória seria produzida com determinados valores do produto  $GmTf$  (número de Camp), onde este produto é um número adimensional.

Ainda segundo CAMP (1955), valores mais altos de  $Gm$  podem ser usados para produção de flocos menores e vice-versa. Assim, a maior economia deve resultar quando a floculação é realizada em vários estágios, em uma série de tanques com os valores de  $Gm$  progressivamente decrescentes, enquanto os flocos aumentam seus tamanhos.

Com relação à cinética da floculação, ARGAMAN (1971) menciona que em um estudo teórico e experimental apresentado por Argaman (1968) e Argaman e Kaufman (1970), foi derivada uma expressão (eq.2) para descrever o desempenho de um floculador com escoamento contínuo, baseada no movimento da partícula em escoamento turbulento, bem como, na agregação e ruptura dos flocos. A ruptura e agregação dos flocos são representadas pela constante de ruptura ( $K_B$ ) e constante de agregação ( $K_A$ ), respectivamente, sendo dependentes, de acordo com ARGAMAN (1971), das propriedades químicas da suspensão e das características hidrodinâmicas do escoamento turbulento no reator.

$$\frac{n_1^0}{n_1^m} = \frac{\left(1 + K_A Gm \frac{Td}{m}\right)^m}{1 + K_B Gm^2 \frac{Td}{m} \sum_{i=1}^{m-1} \left(1 + K_A Gm \frac{Td}{m}\right)^i} \quad (2)$$

Em que:

$n_1^0$ : número de partículas primárias por unidade de volume que entram no reator

$n_1^m$ : número de partículas primárias por unidade de volume que saem do  $m$ -ésimo reator

$T_d$ : tempo de detenção (T)

$m$ : número de compartimentos de mistura completa em série

$G_m$ : gradiente de velocidade médio ( $T^{-1}$ )

Os resultados desse estudo levaram a conclusões importantes, tais como:

- para qualquer eficiência desejada, existe um tempo de detenção mínimo, abaixo do qual não pode ser obtida tal eficiência, qualquer que seja o valor de  $G_m$ . Então, o produto  $G_m T_d$  não é um parâmetro adequado para descrever o efeito da energia de mistura e tempo de detenção sobre o desempenho da floculação;
- para uma mesma eficiência, o tempo total de floculação pode ser reduzido significativamente em função da compartimentação.

Segundo ARGAMAN (1971), experimentos realizados em um floculador em escala piloto utilizando água bruta de uma estação de tratamento em funcionamento, provaram a validade geral da teoria mencionada no parágrafo anterior. Para este autor, embora o uso de *jar tests* tradicionais para controle da floculação proporcione certa indicação do tipo e concentração do coagulante, estudos em escala piloto são essenciais para obter-se com mais segurança o sucesso de projetos de novas estações.

DI BERNARDO (1993) menciona a limitação do número de Camp para ser utilizado em projeto de unidades de floculação, lembrando que há muitas combinações entre  $G_m$  e  $T_f$  que fornecem o mesmo valor do produto  $G_m T_f$ . Segundo este autor, não se deve extrapolar o uso de tal parâmetro para águas de diferentes qualidades.

Muitos trabalhos que relacionam  $G_m$  com  $T_f$  e observações sobre a existência de um valor ótimo de  $G_m$  são citados por ANDREU-VILLEGAS & LETTERMAN (1976). Nesse sentido, estes autores estudaram, entre outras coisas, a influência da extensão de  $T_f$  sobre o valor de  $G_m$  ótimo ou  $G^*$ , como denominado pelos mesmos,

em experimentos de floculação e sedimentação. De acordo com ANDREU-VILLEGAS & LETTERMAN (1976) o valor de  $G^*$  na floculação, é definido como o valor de  $G_m$  que, quando outras condições são mantidas constantes (por exemplo: concentração de coagulante, tempo de floculação e características químicas da água), minimiza a turbidez residual. Para estes autores o valor de  $G^*$  diminui com o aumento de  $T_f$  e apresentam a eq.(3) para descrever essa relação:

$$(G^*)^n T_f = K \quad (3)$$

Onde os valores de  $n$  e  $K$  dependem da qualidade da água bruta e da dosagem de coagulante.

A análise da eq.(3) indica que com o aumento de  $T_f$ , ocorre a diminuição de  $G^*$  e quando  $T_f$  tende ao infinito,  $G^*$  tende a zero (DI BERNARDO et al., 1987 e MENDES, 1989).

Ao estudar diversos tipos de água, MENDES (1989) comenta: “O estudo experimental da floculação dos diversos tipos de água investigadas, fornece subsídios para a proposição de uma equação que melhor representa os parâmetros ótimos de floculação que a proposta por ANDREU-VILLEGAS & LETTERMAN. Descobriu-se que, para qualquer tipo de água, existe um gradiente de velocidade mínimo ( $G'$ ), que permite o aumento da eficiência de remoção de cor e/ou turbidez por sedimentação, indefinidamente, com o aumento do período de floculação. Em outras palavras, quando  $T_f$  tende ao infinito,  $G^*$  tende para o valor de  $G'$ . Assim sendo, propôs-se a seguinte expressão (eq.4) em substituição a de ANDREU-VILLEGAS & LETTERMAN

$$(G^* - G')^n T_f = K'' \quad (4)$$

Outra relação importante entre  $G_m$  e  $T_f$ , é a aplicação de valores decrescentes de  $G_m$  ao longo do período de floculação. Um trabalho relacionado a este tema é o apresentado por BRATBY (1981) onde são descritos metodologia e interpretação de resultados obtidos em ensaios realizados em escala de laboratório para aplicação em projeto em termos de, entre outros, intensidade de floculação ou  $G_m$ . No trabalho apresentado por BRATBY (1981), a otimização de parâmetros de floculação é considerada somente em termos de sedimentação. A metodologia utiliza um tempo de

sedimentação além do qual não é observado melhoria significativa na qualidade do sobrenadante, refletindo na denominada sedimentação “infinita”. A determinação de valores ótimos de  $Gf$  é feita utilizando-se a eq.(2) e os valores de  $K_A$  e  $K_B$  são estabelecidos a partir de ensaios tipo batelada e das equações 5 e 6, mostradas a seguir. Para a utilização da eq.(2), BRATBY (1981) considera  $n_1^0$  como turbidez do sobrenadante para sedimentação “infinita” e tempo de floculação igual a zero e  $n_1^m$  como turbidez do sobrenadante do m-reator em unidades de mistura completa com câmaras em série e escoamento contínuo com tempo de detenção  $T_d$  em m-reatores e tempo de sedimentação “infinito”.

$$\frac{n_1^0}{n} = \left( \frac{K_B}{K_A} Gm + \left( 1 - \frac{K_B}{K_A} Gm \right) e^{-K_A Gm T_d} \right)^{-1} \quad (5)$$

$$\frac{K_B}{K_A} = \frac{1}{Gm \cdot \frac{n_1^0}{n}} \quad (6)$$

Em que:

$n$ : turbidez do sobrenadante em reator tipo batelada com tempo de floculação  $T_d$  e sedimentação “infinita” (uT)

Em trabalho relativamente recente, PÁDUA (1994) propõe uma metodologia que permite determinar os valores de  $Gm$  nas unidades de floculação de mistura completa com câmaras em série e escoamento contínuo, a partir de ensaios realizados em reatores estáticos.

Com relação à metodologia proposta por BRATBY (1981), PÁDUA (1994) comenta que esta foi desenvolvida para velocidade de sedimentação baixa, denominada de sedimentação “infinita”, sendo tal velocidade incompatível com a praticada nas estações de tratamento.

A seguir é apresentada a metodologia proposta por PÁDUA (1994):

- a) Execução dos ensaios de floculação em reatores estáticos, utilizando dosagem de coagulante e pH de coagulação, tempo e gradiente de velocidade médio de mistura rápida previamente otimizados; variando tempo e gradiente de velocidade médio de floculação ( $Gf$ ). A partir dos resultados de turbidez remanescente correspondente à velocidade de sedimentação a ser estudada, montar uma tabela e figura.
- b) Determinação, para o tempo  $Tf/m$ , do  $Gf$  correspondente à menor turbidez remanescente ( $N$ ), sendo  $Tf$  o tempo de floculação otimizado no reator estático e  $m$  o número de câmaras da unidade de floculação de mistura completa com escoamento contínuo. Este será o gradiente na primeira câmara de floculação.
- c) Como a água que chega à segunda câmara está pré-floculada pela passagem na câmara antecedente, é feita a determinação, para cada um dos  $Gf$  estudados, do  $Tf$  que corresponde à turbidez residual ( $N$ ), determinada para a câmara antecedente, fazendo-se interpolação caso necessário. Soma-se a este tempo o valor  $Tf/m$  (tempo teórico de detenção em cada câmara) e determina-se, por interpolação, a turbidez remanescente ( $N$ ) correspondente a este novo tempo. O valor de  $Gf$  que apresentar o menor valor de  $N$  será adotado para a segunda câmara.
- d) Repetição do procedimento do item c até se obter o valor de  $Gf$  para a última câmara da unidade de floculação.

### 3.3 Flotação por ar dissolvido (FAD) <sup>OK!</sup>

A flotação foi originalmente aplicada na área de processamento de minerais. Há menção do uso de flotação no século XV; embora tenha sido considerado um processo viável somente no século XIX. No início a flotação era realizada utilizando-se óleo (de peso específico menor que da água), o qual possibilitava que partículas oleolíficas subissem à superfície de um tanque usado para separação dos minerais desejáveis. O uso de gás na flotação, introduzido por agitação, entra na chamada “flotação moderna”, sendo descoberta em 1902. Seguindo as descobertas e invenções, em 1905 descobriu-se que uma maneira de obter bolhas, que ajudariam a “coletar” as partículas a serem removidas, era pressurizar com ar a suspensão ou injetar água

super saturada com ar. Em 1907 surgiu a idéia da utilização de água super saturada com ar a pressões relativamente altas e injeção dessa no tanque, com a suspensão, através de um bocal, sendo inventada assim a flotação por ar dissolvido (KITCHENER, 1984). Atualmente, a “flotação moderna” é normalmente referida como flotação apenas.

A flotação pode ser definida como a transferência de um sólido em uma fase líquida para a superfície do líquido, através da aderência de bolhas de gás (HYDE et al., 1977; ZABEL, 1984) tornando a densidade aparente dos aglomerados bolha-sólido menor do que a densidade da água (GREGORY & ZABEL, 1990). Diferentes métodos de produzir bolhas de gás originam diferentes tipos de processos de flotação: flotação por ar disperso, flotação por ar dissolvido (FAD) e flotação eletrolítica (ZABEL, 1984).

Segundo GREGORY & ZABEL (1990), na flotação por ar dissolvido, as bolhas são produzidas pela redução da pressão de um escoamento de água saturada com ar. Os três tipos principais de flotação por ar dissolvido são flotação a vácuo, microflotação e flotação por pressurização. Atualmente, a flotação por pressurização é mais amplamente utilizada.

Ainda de acordo com GREGORY & ZABEL (1990), existem três tipos básicos de flotação por ar dissolvido por pressurização: pressurização da vazão total afluente, pressurização de parte da vazão afluente e pressurização de uma vazão de recirculação. Para as aplicações em tratamento de água onde busca-se a remoção de flocos relativamente frágeis, o sistema mais apropriado é a flotação por ar dissolvido por pressurização de uma vazão de recirculação.

Na flotação por ar dissolvido por pressurização de uma vazão de recirculação, parte do efluente clarificado é recirculada, pressurizada e saturada com ar na câmara de saturação. A água de recirculação pressurizada é introduzida no tanque de flotação através de um dispositivo de despressurização e liberação de ar e é misturada com a água floculada. No dispositivo de despressurização, a pressão é reduzida próxima a pressão atmosférica liberando o ar na forma de pequenas bolhas com diâmetro de 20 a

100  $\mu\text{m}$ . As bolhas de ar aderem-se aos flocos e os aglomerados bolhas-floco sobem à superfície (HYDE et al., 1977; ZABEL, 1984; GREGORY & ZABEL, 1990).

Atualmente está intrínseco que o termo flotação por ar dissolvido refere-se a flotação por ar dissolvido por pressurização de uma vazão de recirculação, de forma que, também o é usado no presente trabalho. Considerando que este trabalho é relacionado a flotação por ar dissolvido, entende-se que não seja de interesse mencionar detalhes dos diversos tipos de flotação os quais podem ser levantados em outras publicações, podendo-se citar: HYDE et al. (1977), ZABEL (1984), GREGORY & ZABEL (1990), REALI (1991).

Além da área de processamento de minerais, a flotação tem tornando-se bastante importante em várias aplicações. Dentre diversas áreas que utilizam a flotação por ar dissolvido, pode-se citar: espessamento de lodo em processos de lodos ativados; clarificação final de efluentes de estações de tratamento de águas residuárias; espessamento de lodo residual e clarificação em estações de tratamento de água, separação de óleo livre e emulsionado em, por exemplo, efluentes de refinaria de sabão; separação de materiais graxos e protéicos em efluentes de matadouros e laticínios (BRATBY, 1983); tratamento físico-químico direto de esgotos sanitários (ØDEGAARD, 1995); tratamento físico-químico de efluentes de reatores anaeróbios tratando esgotos sanitários (CAMPOS et al., 1996).

### 3.3.1 Fundamentos gerais da flotação por ar dissolvido

De acordo com SHERGOLD (1984), a condição termodinâmica geral para o contato entre a partícula, solução e bolhas de gás é o estabelecimento de um ângulo de contato finito no limite das três fases (sólido-líquido-gás).

Com relação a aspectos termodinâmicos, KITCHENER (1984) comenta que tem sido universalmente aceito que as partículas nunca são capturadas pelas bolhas a menos que um ângulo de contato finito seja formado entre as três fases. Um ângulo de contato finito significa que o trabalho de aderência da água ao sólido é menor do que o trabalho de coesão das moléculas de água, ou em outras palavras, o sólido é

hidrofóbico. Em geral, quanto maior o ângulo de contato, melhor a flotabilidade, embora não exista uma relação direta entre o ângulo de contato e a taxa de flotação.

Segundo HAHN (1984), a flotação, em um sentido físico, é o movimento ascendente de partículas, flocos ou outros agregados devido ao empuxo. Esse autor discute a clarificação de águas residuárias por flotação por ar dissolvido e, com relação a agregação de bolhas de gás a uma partícula sólida comenta sobre a aderência ou contato permanente entre partículas ou flocos e bolhas de gás. Segundo o autor, a aderência depende das forças resultantes na interface gás-água-sólido derivadas das forças físicas de atração e das forças físico-químicas de repulsão. Esse estágio é, em grande parte, controlado (físico-) quimicamente. Isso pode ser expresso considerando a tensão superficial das interfaces gás-sólido, sólido-líquido e líquido-gás e pode ser indicado pelo ângulo de contato entre as três fases.

#### a) Mecanismos de flotação

De acordo com VRABLIK (1959)<sup>1</sup> e PACKHAM & RICHARDS<sup>2</sup> (1972) apud GOCHIN & SOLARI (1983), a flotação por ar dissolvido opera com sucesso através dos seguintes mecanismos:

- a) colisão entre flocos e bolhas causada por turbulência e/ou atração de cargas;
- b) aprisionamento de bolhas pré-formadas na estrutura dos flocos:
  - b.i) durante a formação do floco ou
  - b.ii) devido a quebra e reconstituição do floco na câmara de flotação ou
  - b.iii) como um resultado do "encontro" entre as bolhas subindo e os flocos sedimentando;
- c) crescimento de bolhas, a partir de núcleos sobre os sólidos no interior das estruturas dos flocos.

---

<sup>1</sup> VRABLIK, E. R. (1959). **Fundamental principles of dissolved-air flotation of industrial wastes.** *Proc. Ind. Waste Conf.*, 14., Purdue Univ. Engng Bull. Ext. Serv. 743-774 apud GOCHIN, R. J., SOLARI, J. (1983). *The role of hydrofobicity in dissolved air flotation.* *Water Research, Great Britain*, v.17, n.6., p.651-657.

<sup>2</sup> PACKHAM, R. F., RICHARDS, W. N. (1972). **Water clarification by flotation - 1.** *Medmenham. (Water Research Centre - Technical Report TP 87) apud GOCHIN, R. J., SOLARI, J. (1983). The role of hydrofobicity in dissolved air flotation.* *Water Research, Great Britain*, v.17, n.6., p.651-657.

Segundo estes autores, a importância relativa de qualquer dos mecanismos mencionados depende do sistema sob investigação. Em muitos casos onde sólidos aparentemente hidrofílicos responderam bem à flotação por ar dissolvido, presumiu-se o predomínio dos mecanismos (b) ou (c).

Considerando que em unidades de flotação por ar dissolvido onde é promovida a floculação antes da flotação, é pouco provável que os mecanismos (b.i) e (b.ii) predominem, já que procura-se minimizar, tanto quanto possível, a turbulência dentro de tais unidades. Também, é pouco provável a ocorrência do mecanismo (c) devido ao baixo grau de supersaturação remanescente em uma câmara típica de flotação por ar dissolvido. A atração de partículas e bolhas com cargas opostas é viável contanto que a turbulência aproximem-nas o suficiente para permitir interação das duplas camadas elétricas. Muitos trabalhos indicam que o principal mecanismo é a colisão por turbulência. Contudo, é conveniente lembrar que qualquer mecanismo que esteja relacionado a uma aderência estável de uma partícula a uma bolha, requer hidrofobicidade, sendo que, somente os mecanismos de aprisionamento improváveis (b.i) e (b.ii) poderiam ocorrer sem hidrofobicidade (GOCHIN & SOLARI, 1983).

#### **b) Principais fatores que afetam a flotação por ar dissolvido**

Conforme comentado acima, a hidrofobicidade é fundamental para a flotação. GOCHIN & SOLARI (1983) estudaram a flotação de partículas e flocos de quartzo para determinar a função do grau de hidrofobicidade sobre a eficiência do processo. Estes autores concluíram que sem hidrofobicidade não há flotação, e que a agregação é muito importante do ponto de vista da cinética do processo.

EDZWALD (1995) comenta que existe consenso e evidência experimental que são necessárias duas condições para que a flotação seja favorecida, quais sejam: neutralização de cargas das partículas e produção de partículas hidrofóbicas.

De maneira geral, pode-se citar os seguintes fatores que influenciam na eficiência da flotação por ar dissolvido: tratamento químico efetivo, floculação, quantidade de ar fornecido, remoção do lodo e dispositivos de despressurização

(LONGHURST & GRAHAM, 1987; GREGORY & ZABEL, 1990). Alguns aspectos relevantes da coagulação e floculação serão discutidos posteriormente (item 3.3.3).

A quantidade de ar fornecida ao tanque de flotação pode ser variada pela alteração da pressão na câmara de saturação, da razão de recirculação ou por ambos. REES et al. (1979) estudando os efeitos da variação da razão de recirculação para diferentes pressões de saturação, concluíram que o importante é a quantidade de ar fornecida e não valores individuais de pressão ou recirculação. Segundo estes autores uma quantidade de ar entre, aproximadamente, 7 e 10 g de ar/ m<sup>3</sup> de água tratada foi requerida para um desempenho ótimo. Isso corresponde a uma pressão entre 350 e 420 kPa e razão de recirculação entre 7 e 8%, para o caso de um saturador com recheio. GREGORY & ZABEL (1990) comentam que a quantidade de ar requerida para o tratamento de águas superficiais depende somente da quantidade total de água a ser tratada, sendo independente da concentração de sólidos suspensos presentes, a menos que tal concentração seja maior que 1000 mg/L. EDZWALD (1995) comenta que há três tipos de medida do ar fornecido: concentração da massa, concentração do volume de bolhas e concentração do número de bolhas. Ainda segundo este autor, na prática, a razão de recirculação, para uma pressão constante da câmara de saturação, é usada como uma medida do ar fornecido.

Nos dispositivos utilizados para a precipitação do ar contido na água saturada (bocais apropriados, válvula de agulha), a pressão deve ser reduzida abruptamente e deve existir condições altamente turbulentas para obter-se liberação efetiva do ar. Contudo a velocidade de saída do escoamento de recirculação deve ser suficientemente baixa para minimizar quebra dos flocos (ZABEL, 1984). Para facilitar o contato entre bolhas e flocos, é essencial uma boa mistura entre a vazão de água de recirculação e a vazão de água floculada (ZABEL, 1984; GREGORY & ZABEL, 1990) o que influencia na qualidade do efluente para uma dada razão de recirculação (MOUCHET, 1983).

O local onde ocorrem os contatos entre bolhas de ar e flocos é freqüentemente denominado zona de contato (ou de reação, de mistura). Assim, a câmara de flotação é dividida em duas zonas, a zona de contato e a zona de clarificação. EDZWALD

(1995) comenta que o propósito da zona de contato é promover contato e aderência de partículas à bolha e o propósito da zona de clarificação é proporcionar condições de relativo repouso para que os aglomerados bolhas-floco subam à superfície.

FUKUSHI et al. (1995) apresentaram um modelo cinético para a flotação por ar dissolvido e a verificação experimental foi realizada utilizando-se uma instalação tipo batelada e uma de escoamento contínuo. O modelo cinético desses autores consiste de equações que descrevem um processo de colisão e aderência entre bolhas-floco em uma zona de contato e velocidade ascensional dos aglomerados bolhas-floco em um tanque de flotação. Com relação ao tempo de mistura na zona de contato, FUKUSHI et al. (1995) comentam que é possível prever o progresso da aderência bolhas-floco e a melhora da taxa de remoção com um aumento do tempo de mistura. Para HAARHOFF & VAN VUUREN (1995), a zona de contato é de importância crucial ao sucesso global da flotação por ar dissolvido, sendo necessário realizar pesquisas e otimização relacionadas a mesma (por exemplo, geometria, hidrodinâmica).

Outro fator que influencia no desempenho da flotação por ar dissolvido é a remoção do lodo acumulado na superfície da câmara de flotação. A remoção pode ser feita continuamente ou intermitentemente por transbordamento (através do aumento do nível da água na câmara de flotação) ou por raspagem mecânica. O método de remoção por transbordamento tem as vantagens de custos baixos de equipamentos e efeito mínimo sobre a qualidade da água tratada porém, apresenta desvantagens relacionadas a perda de água e concentração muito baixa de sólidos no lodo (GREGORY & ZABEL, 1990).

### **c) Utilização de placas em unidades de flotação por ar dissolvido**

Dentre os trabalhos revisados, relativamente poucos mencionam sobre o uso de placas em unidades de flotação. Entretanto, segundo LUNDGREN (1970), tal aplicação existe desde, aproximadamente, a década de 60 na Europa, Ásia e América do Sul para o tratamento de determinadas águas residuárias industriais.

Mencionando para o caso de tratamento de águas residuárias, LUNDGREN (1970), comenta que a introdução de placas paralelas, adequadamente espaçadas, pode resultar em aumento da taxa de aplicação superficial (TAS) e da eficiência do processo devido aos seguintes efeitos: eliminar turbulência e proporcionar uma zona de relativo repouso próximo às placas (causado por forças de atrito entre as placas e o líquido), onde as partículas (flocos) podem subir à superfície sem sofrer interferência do escoamento.

KROFTA & GUSS (1993) apresentam um sistema de flotação e filtração em uma única unidade, o qual pode ser aplicado em tratamento de água, tratamento terciário de águas residuárias e sistemas de reciclagem de água. De acordo com os autores, a capacidade de flotação, no referido sistema, foi aumentada pela introdução de placas paralelas abaixo do nível da água, chegando a uma taxa de, aproximadamente,  $290 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{dia}$ . Segundo os autores, o aumento na capacidade implica em unidades menores e custos mais baixos para um determinado tratamento.

O uso de placas planas paralelas em unidade de flotação por ar dissolvido em escala piloto, aplicada ao tratamento de água de abastecimento, está sendo estudado no Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC, USP, desde 1995. Para a realização desses estudos, foram construídos módulos com as placas planas paralelas inclinadas, os quais eram devidamente colocados dentro da câmara de flotação, de maneira a proporcionar um escoamento horizontal ou vertical.

Um dos estudos realizados no Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC, USP, é apresentado por REALI & MARCHETTO (1996), o qual consistiu em avaliar o desempenho da unidade de flotação por ar dissolvido com escoamento horizontal entre placas planas paralelas inclinadas a  $60^\circ$ , com relação a direção horizontal, aplicada ao tratamento de uma água com cor aparente em torno de 100 uC e turbidez de 6 uT. No referido trabalho, a eficiência da unidade foi avaliada com relação à velocidade do escoamento entre as placas e a quantidade de ar fornecida ao processo. Segundo os autores, a unidade apresentou excelente desempenho no tratamento da água utilizada, operando com valores altos de taxa de aplicação

superficial aparente ( $TAS_{ap}$ ) e requerendo valores de quantidade de ar menores que aqueles exigidos em unidades convencionais de flotação.

Como será mencionado posteriormente (item 4), parte da presente pesquisa foi realizada em uma unidade de flotação por ar dissolvido com escoamento horizontal entre placas planas paralelas inclinadas a  $60^\circ$ , com relação à direção horizontal.

### **3.3.2 Aplicação da flotação por ar dissolvido no tratamento de água de abastecimento**

O tratamento de água é motivado pelos aspectos da saúde e aspectos estéticos da qualidade da água (TATE & ARNOLD, 1990). A seleção do processo de tratamento de água é uma tarefa complexa envolvendo a consideração de muitos fatores. Tal seleção é ditada pela necessidade de produzir qualidade aceitável da água tratada a um custo tão atrativo quanto possível (HAMANN, et al., 1990). Nesse contexto a flotação por ar dissolvido é inserida como uma alternativa de processo de tratamento de água, apesar de sua aplicação nessa área ser relativamente recente, a partir da década de 60.

O uso da flotação por ar dissolvido como etapa para clarificação precedendo o processo de filtração, em um sistema de tratamento de água de abastecimento, tem sido comprovado e recomendado especialmente para certos tipos de água, como por exemplo: águas com alto teor de algas e águas com alta cor e baixa turbidez. Entretanto, EDZWALD (1995) comenta que há uma concepção errada sobre a função da flotação por ar dissolvido, no tratamento de água, ser limitada à águas contendo cor natural ou algas. Segundo o autor, integrando a flotação por ar dissolvido à estação de tratamento como um todo, esta tem amplas aplicações no tratamento de águas superficiais para abastecimento. Para EDZWALD (1995), o conceito de integração da flotação por ar dissolvido a uma estação de tratamento como um todo, implica que o pré-tratamento (adição de coagulante e floculação) afeta o desempenho da flotação e, conseqüentemente, o desempenho da flotação afeta o projeto e desempenho dos filtros.

Após verificação do potencial da flotação por ar dissolvido para o tratamento de água, proporcionada por detalhada revisão da literatura, o Water Research Centre (WRC), Medmenham, Inglaterra, estabeleceu um programa de pesquisas relacionadas ao uso da flotação por ar dissolvido no tratamento de água a partir da década de 70 (ZABEL & HYDE, 1976; HYDE et al., 1977).

REES et al. (1979) desenvolveram estudos, utilizando cinco estações pilotos com vazão de 95 m<sup>3</sup>/h cada, para avaliar a eficiência da flotação por ar dissolvido no tratamento de cinco tipos de águas: água de rio com problemas de algas (acumulada por 3 dias), água de rio com turbidez, água altamente colorida e com baixa turbidez, água rica em nutrientes com problemas de algas (acumulada por longo prazo) e água de um riacho com dureza relativamente alta. As estações foram operadas por um período de dois anos, com o objetivo de verificar os efeitos das mudanças sazonais da qualidade da água sobre o desempenho das estações. Os autores concluíram, entre outras coisas: a flotação foi particularmente efetiva para o tratamento de águas com alto teor de algas e águas altamente coloridas e com baixa turbidez; o tratamento por flotação da água de rio com turbidez, geralmente, produziu uma qualidade da água ligeiramente pior do que produzida por sedimentação, entretanto a qualidade da água após a filtração foi a mesma.

KROFTA & WANG (1982), após testes realizados em escala de laboratório e em escala piloto, apresentaram uma proposta para tratar a água da cidade de Pittsfield, Massachusetts, EUA, consistindo de um sistema com flotação por ar dissolvido e filtração para a clarificação. Após análise dos resultados e da viabilidade econômica, os autores recomendaram que o sistema proposto fosse seriamente considerado pelas municipalidades, para o tratamento de águas de abastecimento, apesar do uso da flotação por ar dissolvido na referida área ser novo naquele país.

No Brasil, a primeira aplicação da flotação por ar dissolvido como uma etapa no tratamento de água de abastecimento, foi realizada por REALI (1984) através de pesquisa desenvolvida em escala piloto. A instalação com escoamento contínuo foi montada na estação de tratamento de água (ETA) de São Carlos, SP. Assim, a água bruta utilizada na pesquisa foi a água bruta afluente à ETA de São Carlos. O autor

concluiu que a flotação por ar dissolvido pode vir a se constituir em alternativa à sedimentação, para determinados casos.

Seguindo ao trabalho de REALI (1984), muitos outros tem sido desenvolvidos, tanto em escala de laboratório quanto em escala piloto, visando a clarificação por flotação por ar dissolvido de vários tipos de água. Alguns desses trabalhos são apresentados em COELHO et al. (1991), REALI (1991), REALI & GIANOTTI (1993), REALI & CAMPOS (1995), REALI & MARCHETTO (1996), REALI & DOMBROSKI (1996), DOMBROSKI et al. (1996).

Ainda com relação a aplicação da flotação por ar dissolvido (em escala real) no tratamento de água no Brasil, é interessante mencionar a experiência da estação de tratamento de água de Meaípe-ES, na qual foram implantadas duas unidades de flotação, em 1994, para substituição da tecnologia existente, que consistia de filtração direta. A substituição da tecnologia de tratamento foi devido a problemas ocasionados pela presença de algas na água bruta, proveniente da lagoa Maembá. Os resultados obtidos após a implantação do sistema de flotação por ar dissolvido na referida ETA, são apresentados em LOBATO et al. (1995). De acordo com esses autores, a flotação demonstrou ser alternativa extremamente vantajosa, em relação aos sistemas convencionais de tratamento de água.

Na Holanda, há 20 anos a flotação por ar dissolvido é utilizada como parte do processo de tratamento de águas de abastecimento. Especialmente para água com turbidez relativamente baixa e alto teor de algas, a flotação provou ser muito efetiva em combinação com filtração rápida em areia (VAN PUFFELEN et al., 1995).

Na África do Sul, a flotação por ar dissolvido começou a ser utilizada no tratamento de águas eutrofizadas no final da década de 70. A eutrofização de águas superficiais tem despertado preocupação crescente e sérios problemas tem sido observados em estações convencionais. Investigações nesse campo levaram à modificações de diversas estações existentes e construções de novas estações utilizando a flotação por ar dissolvido (OFFRINGA, 1995).

De acordo com HEINÄNEN et al. (1995), a Finlândia utiliza a flotação por ar dissolvido como processo de clarificação desde 1965. Segundo os autores, as águas

brutas na Finlândia, são do tipo coloridas e o desempenho das estações de tratamento com flotação por ar dissolvido tem mostrado a capacidade do método no tratamento desses tipo de água.

Nos Estados Unidos, o uso da flotação por ar dissolvido no tratamento de água é uma prática bem mais recente. Segundo NICKOLS et al. (1995), a primeira estação de tratamento de água com flotação por ar dissolvido nos Estados Unidos, é a estação na cidade de New Castle, New York, posta em operação em 1993.

Com relação às possíveis vantagens da flotação por ar dissolvido, a seguir são citadas algumas:

- pode operar com altas taxas de aplicação superficial, (MOUCHET, 1983; ZABEL, 1985); até  $288 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$  (REES et al., 1979); 120 a  $360 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$  (EDZWALD & WINGLER, 1990);
- resultam em unidades relativamente pequenas e com baixa profundidade, (ZABEL, 1985; EDZWALD & WINGLER, 1990; EDZWALD et al., 1992) profundidade de 1,2 a 1,6 m (REES et al., 1979); 1,2 a 2 m (ZABEL, 1984); 1,5 m (GREGORY & ZABEL, 1990);
- as dosagens de coagulante e auxiliar de floculação podem ser mais baixas do que para sedimentação (EDZWALD et al., 1992);
- partida rápida, podendo alcançar qualidade constante da água em 45 minutos (REES et al., 1979; ZABEL, 1985);
- concentração de sólidos, relativamente alta, no lodo produzido, (ZABEL, 1985; EDZWALD et al., 1992), podendo ser apropriado para desidratação (filtro prensa) sem espessamento intermediário (REES et al., 1979; MOUCHET, 1983);
- remoção de matéria orgânica volátil, sabor e odor por “stripping” durante a flotação (EDZWALD & WINGLER, 1990; REALI, 1991);
- melhor remoção de partículas com baixa densidade e algas, as quais podem diminuir a duração das carreiras de filtração em estações convencionais ou de filtração direta (EDZWALD et al., 1992);
- menos gasto de água para lavagem dos filtros, pelo aumento das carreiras de filtração, quando comparada com filtração direta (SHNEIDER et al., 1991).

Como desvantagem, EDZWALD et al. (1992) cita os custos mais altos com energia elétrica para recalque da água de recirculação, contudo, esses custos podem ser compensados pelos gastos com produtos químicos, tratamento e disposição de lodo.

### **3.3.3 Influência da coagulação e floculação no desempenho da flotação por ar dissolvido**

#### **a) Coagulação**

Segundo GREGORY & ZABEL (1990), a dosagem de coagulante e o pH de coagulação devem ser otimizados para que a clarificação por flotação seja efetiva. Os autores comentam que não tem sido observado diferenças significantes nos requerimentos de produtos químicos primários para flotação e sedimentação, contudo, a flotação é sensível a sub ou superdosagem devido ao curto tempo de detenção na estação. De acordo com estes autores, as dosagens ótimas dos produtos químicos podem ser determinadas através de equipamento de *jar test*.

Com relação à otimização da dosagem de coagulante e pH de coagulação visando a flotação, REALI & CAMPOS (1995) observaram que para o tipo de água estudada (cor elevada e baixa turbidez), as condições ótimas de coagulação obtidas em ensaios de sedimentação (utilização de equipamento de *jar test*) foram diferentes das condições obtidas em testes de flotação (utilização de equipamento de flotatete). Assim, estes autores concluíram que as condições ótimas de coagulação para flotação devem ser determinadas em equipamento tipo flotatete.

LONGHURST & GRAHAM (1987) apresentam um levantamento, realizado em 1985 na Grã Bretanha, feito para avaliar unidades de flotação por ar dissolvido, utilizadas no tratamento de água de abastecimento. Entre outros resultados obtidos através do levantamento, o tratamento químico efetivo é mencionado como um pré-requisito para uma floculação efetiva, sem a qual, não pode haver flotação. Alguns comentários feitos por LONGHURST & GRAHAM (1987) com relação ao tratamento químico foram: para a flotação não são necessários produtos químicos

especiais; todos os coagulantes, auxiliares de coagulação e produtos químicos utilizados para ajuste do pH convencionais são adequados para a flotação; em geral, são necessárias dosagens menores do que para sedimentação; a dosagem pode ser reduzida utilizando-se um auxiliar de coagulação.

A necessidade da otimização da coagulação também é comprovada por EDZWALD & WINGLER (1990). Os autores estudaram a remoção de algas por flotação e sedimentação em ensaios a nível de laboratório. Foram estudados dois tipos de coagulante, sulfato de alumínio e cloreto de polialumínio (PACl). De acordo com os autores, para o bom desempenho da flotação, é requerida a otimização da coagulação, isto é, condições de coagulação (tipo de coagulante, dosagem e pH) que produzam partículas desestabilizadas.

Segundo EDZWALD (1995), condições de coagulação que reduzam as cargas das partículas e produzam partículas hidrofóbicas, são requeridas para ocorrer condições favoráveis para aderência de bolhas às partículas. As dosagens de coagulante e condições de pH que satisfaçam esses critérios dependem do tipo de coagulante e características da qualidade da água bruta, particularmente, concentração de partículas, dureza e concentração e tipo de matéria orgânica natural (MON).

EDZWALD (1995) considera as condições ótimas de coagulação visando a flotação sob duas situações. Uma das situações é para o caso onde os requisitos de desestabilização de partículas para a flotação por ar dissolvido, são similares aos de outros processos de separação, tais como, filtração direta ou sedimentação. Esse é o caso da maioria das águas brutas, as quais tem uma concentração suficiente de MON de natureza húmica, sendo que, as partículas hidrofóbicas são produzidas com coagulantes metálicos e, não existe necessidade para adição de polímeros orgânicos (auxiliares de flotação) para aumentar a hidrofobicidade das partículas. Contudo, as partículas de hidróxido de alumínio em água pura (tratada por osmose reversa, troca iônica, carvão ativado e filtração a 0,2  $\mu\text{m}$ ) são hidrofílicas e não flutam adequadamente. Para situações em que as águas apresentam baixa turbidez, baixa concentração de MON e a composição da MON é, basicamente, de matéria orgânica

hidrofílica e de baixo peso molecular, pode ser necessário a utilização de um auxiliar de flotação. A função do polímero é adsorver sobre as partículas de hidróxido de alumínio e criar pontos hidrofóbicos. Também, o polímero pode ter tamanho suficiente para estender-se, a partir da superfície do hidróxido de alumínio, dentro da solução, para distâncias maiores do que a camada de água adsorvida e aderir às bolhas.

Ainda de acordo com EDZWALD (1995), o tratamento de águas relativamente limpas por flotação por ar dissolvido pode ser obtido utilizando-se coagulantes que não produzam partículas hidrofílicas. A maioria dos coagulantes PACl pode ser usada ou sais de ferro podem produzir menos partículas hidrofílicas do que o sulfato de alumínio.

#### **b) Flocculação**

É necessário que haja flocculação para que as partículas coaguladas sejam removidas por flotação. O desempenho da flotação é afetado pelo tempo de flocculação, grau de agitação e forma como é promovida a agitação. As condições de flocculação visando a flotação são diferentes daquelas visando a sedimentação (GREGORY & ZABEL, 1990).

O tempo de flocculação necessário depende do tipo da água que está sendo tratada (REES et al., 1979; ZABEL, 1984; GREGORY & ZABEL, 1990). Com relação aos resultados obtidos em experimentos realizados em escala piloto, REES et al. (1979) comentam que um tempo de flocculação de 12 minutos foi suficiente para uma água com alto teor de algas, contudo, para outros dois tipos de água, altamente colorida e água de rio com turbidez, um melhor desempenho no tratamento foi obtido com tempos de flocculação mais longos. ZABEL (1984) e GREGORY & ZABEL (1990) também confirmam valores mais altos de tempo de flocculação para água colorida e com baixa alcalinidade em relação à água com algas: 20 minutos e de 12 a 15 minutos, respectivamente. Para esses autores, o estágio da flocculação é muito importante para operação eficiente do processo de flotação.

Por outro lado, alguns trabalhos tem mencionado que tempos menores de floculação, precedendo a flotação, são suficientes para obter bom desempenho por flotação. Um trabalho que destaca tempo, relativamente, curto de floculação é apresentado por MALLEY & EDZWALD (1991b). Os autores realizaram ensaios em escala de laboratório, testando dois métodos de clarificação, sedimentação e flotação, para águas sintéticas e naturais. Algumas das condições operacionais utilizadas nos ensaios de flotação foram: mistura rápida: tempo de 2 minutos e gradiente de  $380 \text{ s}^{-1}$ ; velocidade de flotação:  $0,84 \text{ m/h}$  ( $20 \text{ m/d}$ ); gradiente de floculação:  $10 \text{ s}^{-1}$ . Uma das conclusões apresentadas pelos referidos autores foi que a flotação foi capaz de alcançar bom desempenho com tempos de floculação de 5 minutos ou menos, usando sulfato de alumínio como coagulante e para temperatura de  $22,5 \pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , para as águas estudadas. Segundo os autores, a remoção de contaminantes dissolvidos (cor verdadeira, carbono orgânico dissolvido e outros) foi a mesma para flotação e sedimentação. Para estes autores, essas constatações confirmam a premissa que a remoção de contaminantes dissolvidos é dependente do processo de coagulação e independente do processo de separação. Então, no trabalho apresentado por MALLEY & EDZWALD (1991b), observa-se que a variação do tempo de floculação foi feita somente para análise de remoção de turbidez. Nos outros ensaios comparativos entre flotação e sedimentação foi utilizado tempo de floculação de 20 minutos ( $G= 10 \text{ s}^{-1}$ ). As mesmas condições operacionais mencionadas acima foram utilizadas para os ensaios de sedimentação, exceto pela velocidade de sedimentação que foi de  $0,14 \text{ m/h}$  ( $3,4 \text{ m/d}$ ).

De acordo com EDZWALD et al. (1992) tempos de floculação de 16 minutos (dois compartimentos de floculação com velocidade dos agitadores de 12 e 6 rpm, para o primeiro e segundo compartimento respectivamente) e 8 minutos (um compartimento de floculação com velocidade do agitador de 12 rpm) proporcionaram desempenho equivalente da flotação por ar dissolvido para as seguintes condições:

- experimentos realizados em escala piloto com água natural (lago Whitney, New Haven, Connecticut, EUA);

- qualidade da água bruta durante os experimentos: temperatura média de 18 °C, turbidez de 4,7 a 5,6 uT; concentração média de carbono orgânico dissolvido de 4,6 mg/L;
- coagulante e dosagem utilizada: 23 a 27 mg/L de cloreto férrico;
- outras condições operacionais: razão de recirculação de 10%, pressão de saturação de 510 kPa, TAS  $\cong$  290 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia.

Experimentos feitos sem floculação resultaram em desempenho ruim da flotação. A turbidez residual após a flotação, para tempo de floculação de 16 e 8 minutos foi de 0,4 a 0,9 uT. Os autores também mencionam o fato de que não houve diferença no gradiente de perda de carga dos filtros para os dois períodos de floculação.

Segundo JANSSENS (1992), em vista da natureza do processo de flotação por ar dissolvido, são necessários flocos leves e pequenos porém, fortes para que resistam à turbulência, relativamente alta, e cisalhamento junto a saída da água de recirculação. Para JANSSENS (1992), o bom desempenho da flotação depende de coagulação-desestabilização apropriada e microfloculação. No entanto, segundo esse autor, não é possível dar regras gerais de projeto, a otimização deve ser feita para cada situação específica.

Para EDZWALD (1995), tempos de floculação de 5 a 10 minutos (3 a 6 minutos, para vazões máximas) são viáveis e recomendados.

HAARHOFF & VAN VUUREN (1995) apresentam resultados de um levantamento sobre parâmetros de projeto usados na África do Sul, parâmetros utilizados em outros países, disponíveis na literatura, e sugestões de parâmetros com relação ao uso da flotação por ar dissolvido na clarificação de água e espessamento de lodo. Para a clarificação de água, verificou-se que tempos de floculação entre 5 e 120 minutos são utilizados na prática, na África do Sul, e entre 20 e 127 minutos, na Finlândia. Contudo, esses autores recomendam tempos de floculação de 4 a 15 minutos. Com relação ao gradiente de velocidade médio de floculação, foram levantados valores práticos, na África do Sul, de 45 a 130 s<sup>-1</sup>; sendo recomendados valores entre 50 a 120 s<sup>-1</sup>.

ØDEGAARD (1995) estudando a otimização da floculação em sistemas de floculação-flotação, para o tratamento de águas residuárias, encontrou: tempo de floculação ótimo de 25 a 30 minutos; gradiente ótimo de floculação de 60 a 80  $s^{-1}$ ; valores decrescentes dos gradientes de floculação, de um compartimento para outro, não são favoráveis e, a unidade de floculação deve ter no mínimo dois compartimentos. Segundo o autor, a pesquisa não confirmou o que vem sendo levantado com relação ao tempo de floculação poder ser substancialmente menor, em sistemas de floculação-flotação, do que em sistemas de floculação-sedimentação. Com relação à intensidade de agitação encontrada, o autor comenta que a mesma, está de acordo com as constatações para tratamento de água.

Outras informações levantadas na literatura, com relação ao gradiente de velocidade médio de floculação serão mencionadas a seguir. Valores do gradiente de velocidade médio de floculação de 70 a 75  $s^{-1}$ , são apresentados como ótimos em alguns trabalhos (REES et al., 1979; ZABEL, 1984, GREGORY & ZABEL, 1990). De acordo com ZABEL & HYDE (1976) e REES et al. (1979), não é necessário utilizar valores decrescentes de gradiente de velocidade médio de floculação.

O levantamento apresentado por LONGHURST & GRAHAM (1987), mostra que a maioria dos projetos é de dois ou três compartimentos de floculação, com valores decrescentes do gradiente de velocidade médio, em cada compartimento sucessivo. Em alguns casos, o último compartimento de floculação é usado somente para aumentar o tempo de detenção, não ocorrendo mistura.

Para VALLANCE et al. (1995), os valores dos gradientes médios de velocidades deverão variar de acordo com o tipo de coagulante utilizado e a qualidade da água bruta. Assim, é necessário que os valores de gradientes possam ser variados, em função das diferentes condições da água bruta. Para as condições estudadas por VALLANCE et al. (1995), os resultados preliminares levaram a utilizar valores decrescentes do gradiente médio de floculação de 70-50  $s^{-1}$  e 125-75  $s^{-1}$ , para dois compartimentos de floculação, tempo total de floculação de 13,2 minutos e diferentes coagulantes.

Com relação ao número de compartimentos de floculação, GREGORY & ZABEL (1990), comentam que, geralmente, são utilizados dois. Segundo os autores, mais compartimentos podem ser utilizados, porém, usualmente, o aumento na relação custo/benefício não justifica tal opção. Um bom desempenho da flotação foi encontrado por KAMINSKI et al. (1991) para dois compartimentos de floculação precedendo a câmara de flotação.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Considerações iniciais

O foco principal deste trabalho refere-se ao estudo da influência das condições de floculação na eficiência da clarificação por flotação de uma água, denominada água tipo I, através de ensaios realizados em reator estático e instalação com escoamento contínuo. A água tipo I foi preparada de forma a apresentar cor aparente em torno de 100 uC e turbidez próxima de 6 uT. Adicionalmente, foi realizado estudo extra, relativamente breve, empregando-se outra água preparada (tipo II), apresentando cor aparente em torno de 250 uC e turbidez de, aproximadamente, 5 uT. Para a água tipo II foram realizados ensaios de coagulação-floculação-sedimentação e ensaios de coagulação-floculação-flotação utilizando-se reator estático, seguidos de algumas carreiras de operação na instalação com escoamento contínuo visando a avaliação da eficiência da clarificação por flotação. Os ensaios realizados com a água tipo II foram desenvolvidos em parceria com MARCHETTO (1996).

Então, para a realização da pesquisa, utilizou-se um reator estático de floculação-flotação por ar dissolvido (flotateste) e uma instalação com escoamento contínuo de coagulação-floculação-flotação por ar dissolvido de alta taxa. A instalação com escoamento contínuo foi concebida para apresentar em seu interior placas planas paralelas inclinadas, dispostas de forma a proporcionar escoamento horizontal associado a baixos valores de número de Reynolds. O estudo e avaliação dos parâmetros de projeto desse tipo de unidade não fizeram parte do escopo do presente trabalho, onde foi dado ênfase apenas à influência das condições de floculação na eficiência da flotação. Mais detalhes da referida unidade podem ser obtidos em MARCHETTO (1996).

Para a água tipo I, estudou-se a influência na flotação dos seguintes parâmetros relacionados à floculação: gradiente de velocidade médio, tempo teórico e número de compartimentos de floculação. Os ensaios realizados no reator estático incluíram otimização da dosagem de coagulante e pH de coagulação, otimização da quantidade de ar fornecida, otimização do tempo e gradiente de velocidade médio da mistura rápida, otimização do tempo e gradiente de velocidade médio de floculação e escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação. Com base nos resultados obtidos com os ensaios realizados no reator estático, foram escolhidos quatro valores de tempo teórico de floculação a serem aplicados na instalação com escoamento contínuo, considerando as limitações operacionais da mesma. Dos quatro valores de tempo teórico de floculação utilizados na instalação com escoamento contínuo, dois foram estudados sob diferentes condições de gradiente de velocidade médio e número de compartimentos da unidade de floculação.

Para a água tipo II, os ensaios no reator estático foram feitos com objetivo de adequar a dosagem de coagulante e pH de coagulação, bem como, comparar os resultados obtidos com ensaios de coagulação-floculação-flotação e coagulação-floculação-sedimentação, para as mesmas condições de ensaio. Alguns ensaios foram feitos na instalação com escoamento contínuo para a água tipo II, sendo que os parâmetros operacionais foram definidos a partir dos resultados obtidos no reator estático. Deve-se ressaltar que foi possível apenas a execução de pequeno número de ensaios com a instalação com escoamento contínuo alimentada com a água tipo II, devido a limitações impostas pelo cronograma previsto para a pesquisa. Assim, tais resultados servem apenas para dar idéia do comportamento da floculação-flotação deste tipo de água (tipo II), ao contrário dos resultados obtidos com a água tipo I, os quais constituíram o foco principal da pesquisa, conforme já mencionado.

## 4.2 Descrição das instalações

### 4.2.1 Descrição do reator estático de floculação-flotação por ar dissolvido (flotateste)

O flotateste é constituído de quatro jarros independentes entre si e interligados a uma câmara de saturação. Cada um dos jarros possui um agitador próprio, o qual está ligado a um regulador de tensão para controle da energia fornecida para a floculação. Cada agitador é impulsionado por meio de um conjunto moto-redutor acoplado ao sistema. Uma fotografia do flotateste é apresentada na figura 3.

A capacidade útil de cada jarro é de 2,1 litros, tendo seção transversal circular com diâmetro interno de 60 mm e altura de 750 mm, sendo construído a partir de tubo de acrílico de espessura de 5 mm. O agitador é do tipo de eixo vertical com paletas paralelas ao eixo, tendo dois braços e uma paleta por braço. Na figura 4 é apresentado um esquema geral do flotateste e detalhe do agitador.

A câmara de saturação também foi construída a partir de tubo de acrílico de espessura de 6 mm, apresentando seção transversal circular com diâmetro interno de 82 mm e altura de 970 mm, possuindo volume útil de 3 litros. A câmara de saturação possui manômetro, válvula de segurança, entrada de ar comprimido e entrada de água. A água que entra na câmara é água tratada da rede pública. O ar injetado na câmara é proveniente de um compressor de ar (marca Shulz, modelo MSI-2,6VL/40; C56 JZ; 1/2 CV; 850 rpm). A entrada de água nos jarros de flotação é controlada por registros de agulha, conforme mostrado na figura 4.

O gradiente de velocidade médio no flotateste, em função do número de rotações do agitador, foi obtido a partir da seguinte equação (eq.7), determinada por SANTOS (1995)<sup>1</sup>:

---

<sup>1</sup> SANTOS, S. P. dos (1995). (USP. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento). Comunicação pessoal.

$$\log (G)= 1,32555(\log \text{ rotação}) - 0,47919 \quad (7)$$

Em que:

$\log (G)$ = logaritmo do gradiente de velocidade médio ( $G$  em  $T^{-1}$ ).

$\log (\text{rotação})$ = logaritmo do número de rotações por minuto.

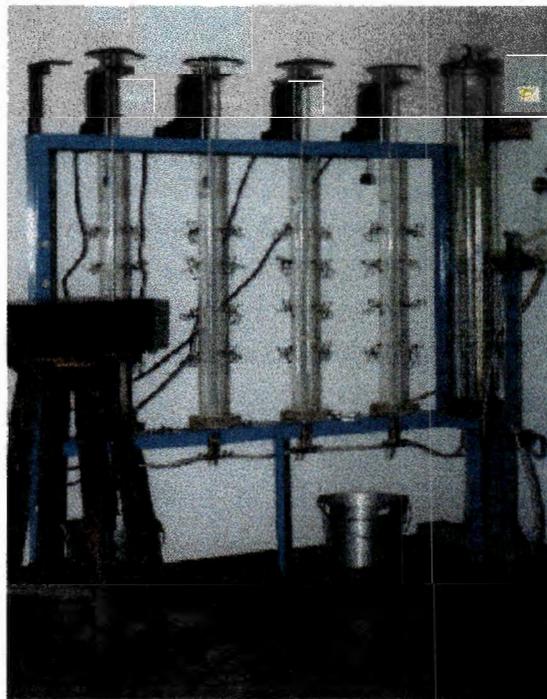


FIGURA 3 - Fotografia do reator estático de floculação-flotação por ar dissolvido (flotateste).



#### **4.2.2 Descrição da instalação com escoamento contínuo de coagulação-floculação-flotação por ar dissolvido de alta taxa**

Basicamente, a instalação com escoamento contínuo é constituída de uma unidade de mistura rápida tipo tubular, uma unidade de floculação mecanizada com três compartimentos em série, uma câmara de flotação com escoamento horizontal entre placas planas paralelas inclinadas a  $60^\circ$  e uma câmara de saturação com recheio. A figura 5 mostra um esquema geral e a figura 9 mostra uma fotografia parcial da instalação com escoamento contínuo.

A unidade de mistura rápida consiste de um injetor acoplado a montante de um reator tubular construído de acordo com recomendações de HESPANHOL (1977). As dimensões da unidade de mistura rápida são mostradas na figura 8.

A unidade de floculação pode ser usada com uma câmara, duas ou três câmaras em série, sendo que cada câmara possui entrada independente de água coagulada controlada por registro de esfera. A passagem da água floculada de uma câmara para outra se dá através de uma abertura com dimensão de 5 cm por 5 cm. Na figura 10 é mostrado uma fotografia da unidade de floculação.

Quando a floculação era realizada em um compartimento, a água coagulada era encaminhada para a terceira câmara da unidade de floculação, sendo previamente fechada a abertura entre a terceira e a segunda câmara através de uma comporta feita de placa de acrílico. A comporta colocada na abertura, mantinha-se fixa devido a ajuste de um parafuso longo, encaixado na mesma, controlado externamente à câmara (ver figura 10). Essa comporta não vedava completamente a passagem de água e por isso, nessas condições de ensaio, mantinha-se a câmara adjacente com água, ao mesmo nível da água da câmara que estava sendo usada, de maneira que as pressões hidrostáticas fossem iguais, evitando assim que a água passasse da terceira para a segunda câmara de floculação.

A abertura entre a segunda e a terceira câmara de floculação encontra-se posicionada na parte superior da parede comum entre as câmaras, sendo de fácil acesso. Então, quando a floculação era realizada em dois compartimentos, a abertura

entre a segunda e a primeira câmara era fechada manualmente por meio de um tampão de borracha e a água coagulada era encaminhada para a segunda câmara de floculação. Da mesma maneira como descrito no parágrafo anterior, mantinha-se o mesmo nível de água nas três câmaras.

Os agitadores do sistema de floculação possuem controles de rotação independentes e são do tipo de eixo vertical com paletas paralelas ao eixo. Cada agitador possui quatro braços e duas paletas por braço. A configuração dos agitadores e dimensões das câmaras de floculação são mostrados na figura 6.

A unidade de flotação consiste de uma câmara, no início da qual encontra-se o dispositivo de entrada da vazão de recirculação proveniente da câmara de saturação, sendo essa região chamada de zona de contato. A zona de contato é a região onde ocorre encontro entre os flocos e as microbolhas de ar geradas após a despressurização da vazão de recirculação. O dispositivo de despressurização consiste de um registro de agulha. Após a zona de contato está a zona de separação, região onde ocorre a flotação propriamente dita. A zona de separação possui escoamento horizontal entre placas planas paralelas inclinadas a  $60^\circ$  com relação a direção horizontal (figuras 9 e 11). Os flocos removidos são acumulados na superfície total da zona de separação formando uma camada de lodo. A figura 6 mostra as dimensões da unidade de floculação e da unidade de flotação.

Parte da água clarificada na unidade de flotação é recalçada por uma bomba centrífuga multi-estágio de alta pressão para a câmara de saturação. A câmara de saturação é do tipo com recheio, sendo este constituído de anéis de PVC com diâmetro de 30 mm e comprimento de 2 cm, conforme proposto por REALI & CAMPOS (1992). Na parte superior da câmara é injetado ar comprimido de maneira que o recheio fique envolto por ar, assim a água submetida a alta pressão, é saturada de ar ao passar pelo recheio. Nas figuras 7 e 13 são mostradas as principais características e uma fotografia da câmara de saturação.

A instalação com escoamento contínuo possui, ainda, dois reservatórios de fibra de vidro com capacidade de 3000 litros cada, utilizados para armazenamento e preparação da água de estudo. A homogeneização da água de estudo dentro dos

reservatórios é produzida a partir de injeção de ar comprimido através de difusores de ar colocados no fundo dos reservatórios (um para cada reservatório). Em cada reservatório, instalado na parede, há um aquecedor constituído de uma resistência elétrica blindada de 3000 watts de potência. Tais aquecedores são controlados por um termostato e foram utilizados para elevação da temperatura da água de estudo quando isso se fez necessário. Quando a temperatura ambiente era relativamente alta e a temperatura da água de estudo tendia a passar do limite máximo proposto para a pesquisa, foram utilizados aspersores de água colocados sobre os reservatórios. A aspersão de água sobre os reservatórios ajudou a evitar o aumento rápido da temperatura da água contida nos mesmos. Uma fotografia dos reservatórios é mostrada na figura 15.

A instalação com escoamento contínuo conta com uma segunda alternativa para aquecimento da água de estudo, consistindo de três aquecedores elétricos instalados na tubulação entre os reservatórios e a unidade de floculação. Esses aquecedores são controlados por um regulador de tensão. A escolha do método utilizado para aquecimento da água era definido considerando-se as limitações dos mesmos, em função da temperatura inicial da água, temperatura da água que deveria ser atingida e vazão afluyente à instalação com escoamento contínuo. A figura 12 mostra uma fotografia de tais aquecedores.

Outros componentes da instalação com escoamento contínuo são: reservatório para preparação da solução de coagulante e reservatório para preparação da solução de alcalinizante (ambos com medidor volumétrico de vazão), compressor de ar (marca Shulz, modelo MSV-10VL/200; 2 CV; 850 rpm), dois medidores eletromagnéticos de vazão acoplados a conversores (marca Engisntrel Engematic, modelo 570 TM e AM11-AS, respectivamente) para controle da vazão afluyente e vazão de recirculação. Em cada um dos reservatórios de preparação da solução de coagulante e solução de alcalinizante, encontra-se acoplada uma bomba dosadora (marca Wallace & Tiernan, modelo G 20 50 MD). Na figura 14 são apresentadas fotografia do medidor da vazão afluyente e os dois conversores eletromagnéticos de vazão. O medidor da vazão de recirculação é mostrado na figura 13.

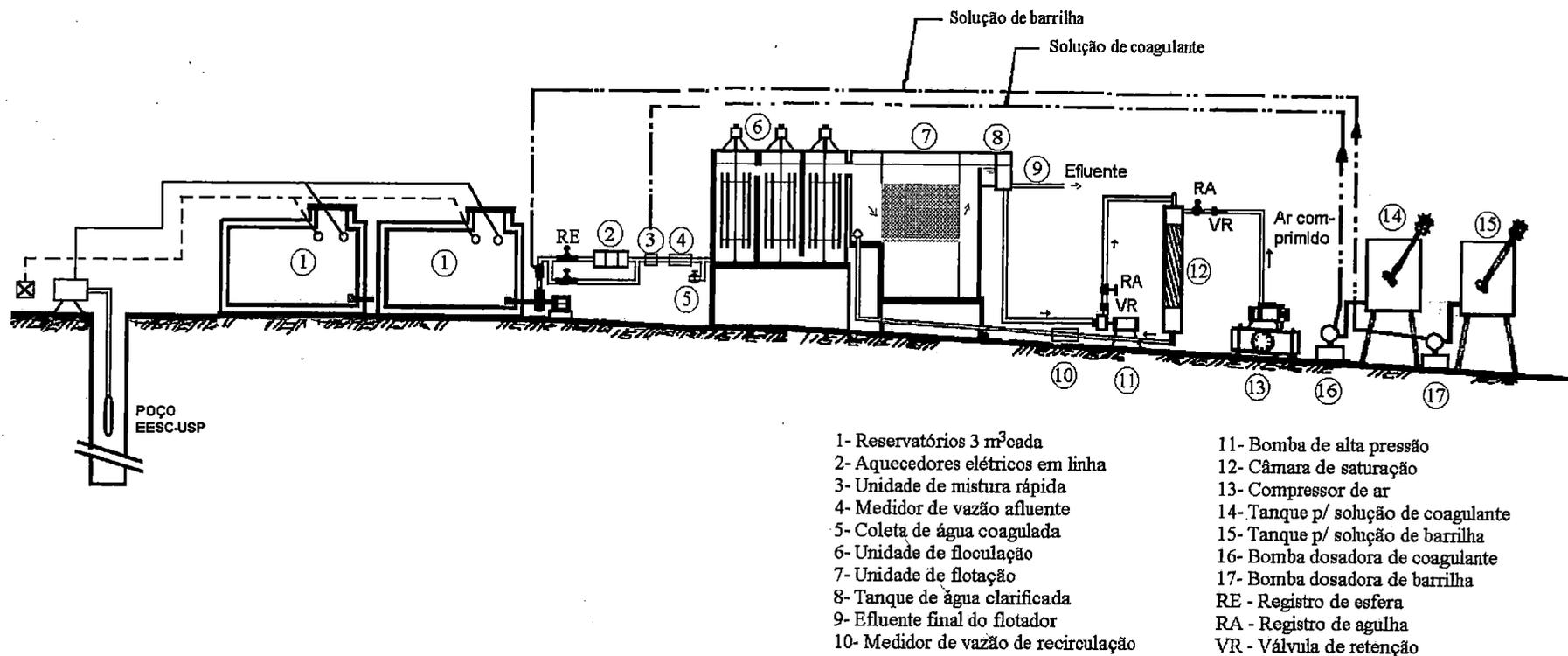
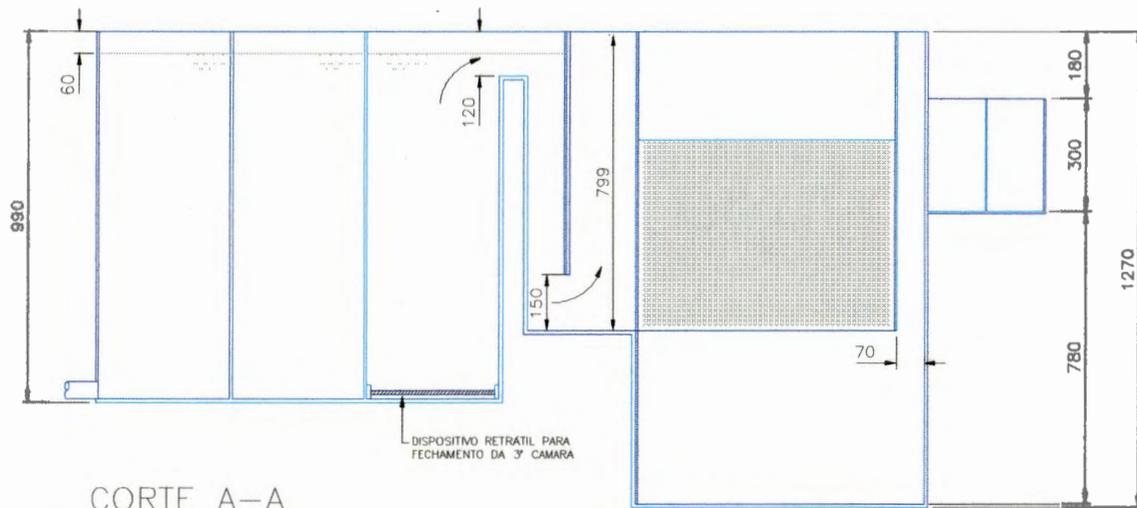
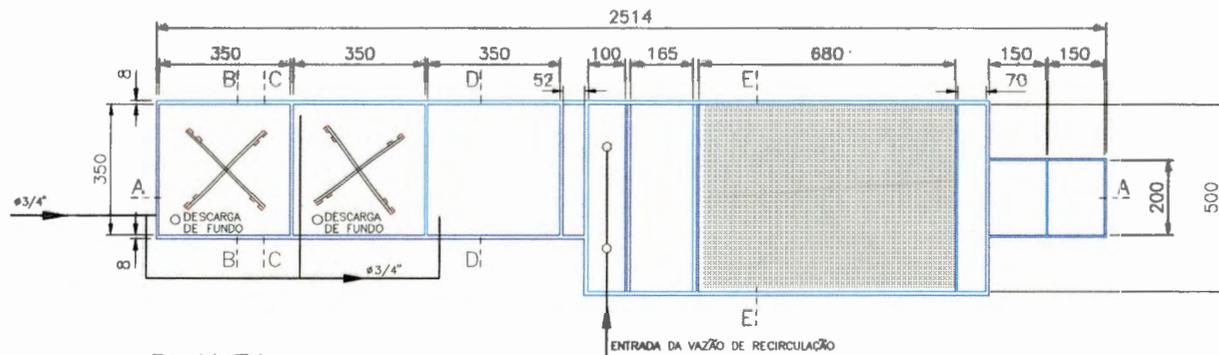


FIGURA 5 - Esquema geral da instalação com escoamento contínuo de coagulação-floculação-flotação por ar dissolvido de alta taxa



CORTE A-A



PLANTA

FIGURA 6 - Dimensões das unidades de floculação e flotação da instalação com escoamento contínuo.

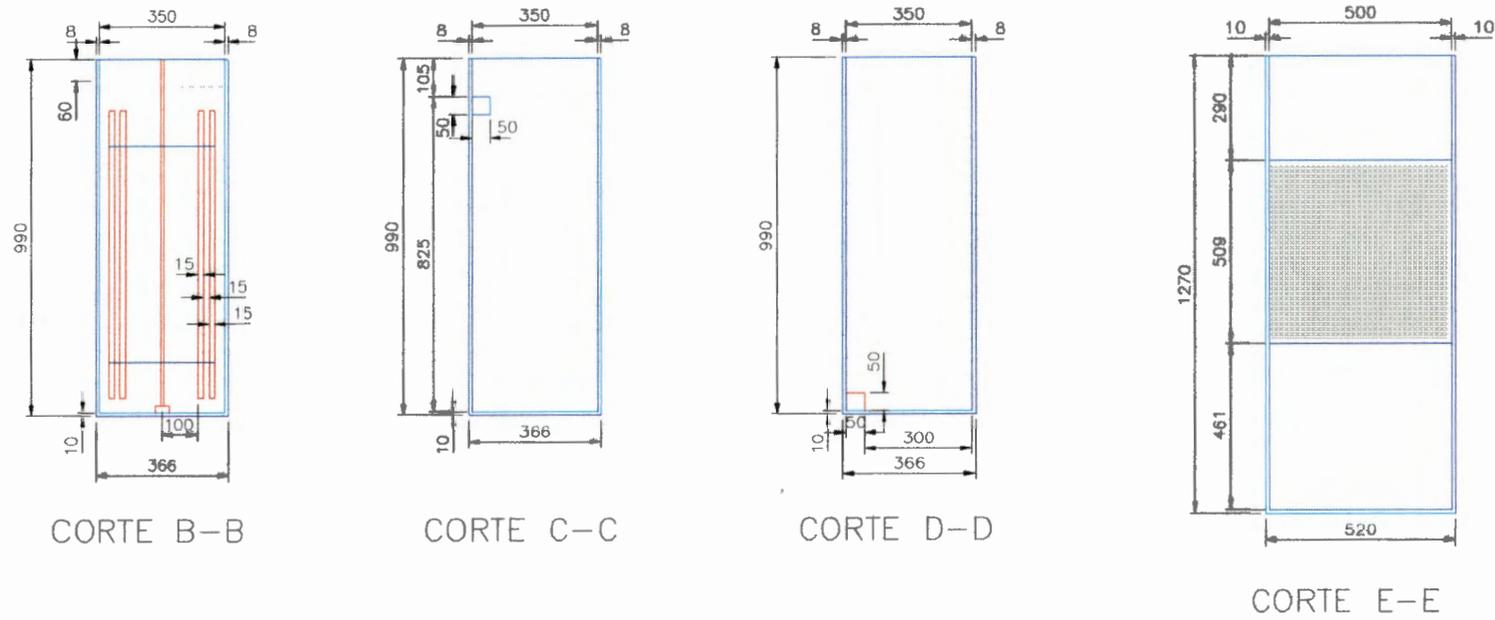


FIGURA 6 (cont.)- Dimensões das unidades de floculação e flotação da instalação com escoamento contínuo.

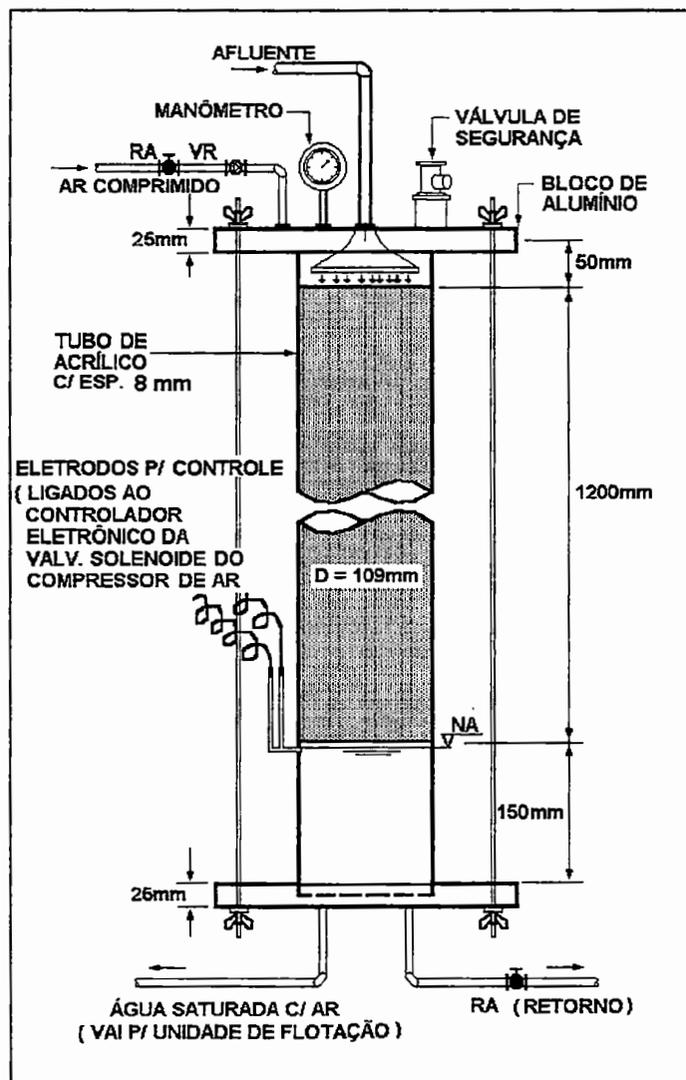


FIGURA 7 - Esquema da câmara de saturação.

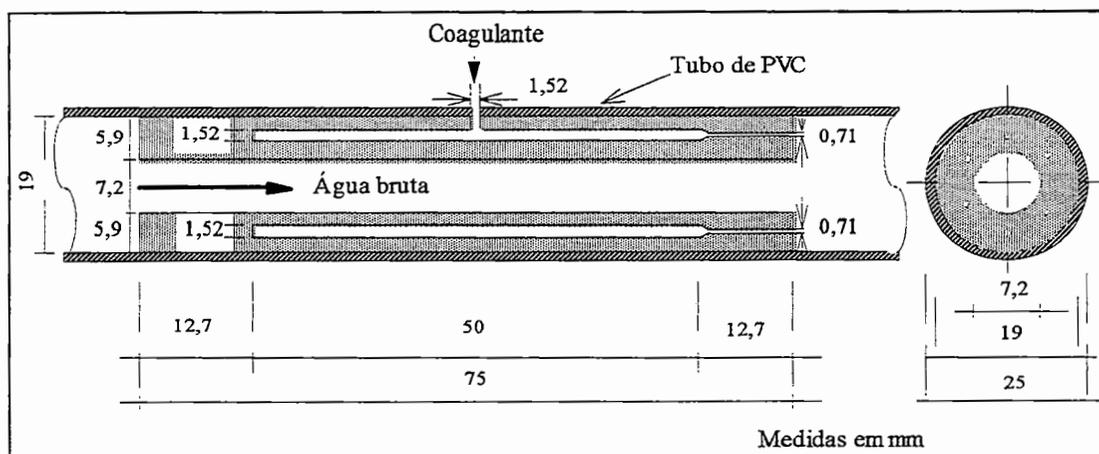


FIGURA 8 - Injetor com 6 orifícios usado para dispersar a solução de coagulante na água bruta.



FIGURA 9 - Fotografia apresentando uma vista parcial da instalação com escoamento contínuo.



Parafuso para fechamento da comporta entre a segunda e a terceira câmara

FIGURA 10 - Fotografia da unidade de floculação da instalação com escoamento contínuo.

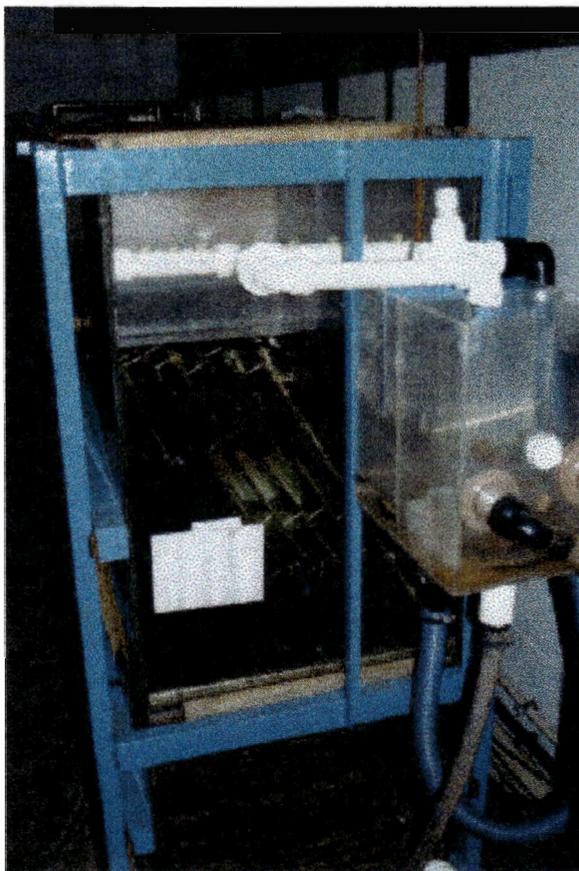


FIGURA 11 - Fotografia da vista lateral da câmara de flotação.



FIGURA 12 - Fotografia dos aquecedores elétricos instalados na tubulação à montante da unidade de mistura rápida.

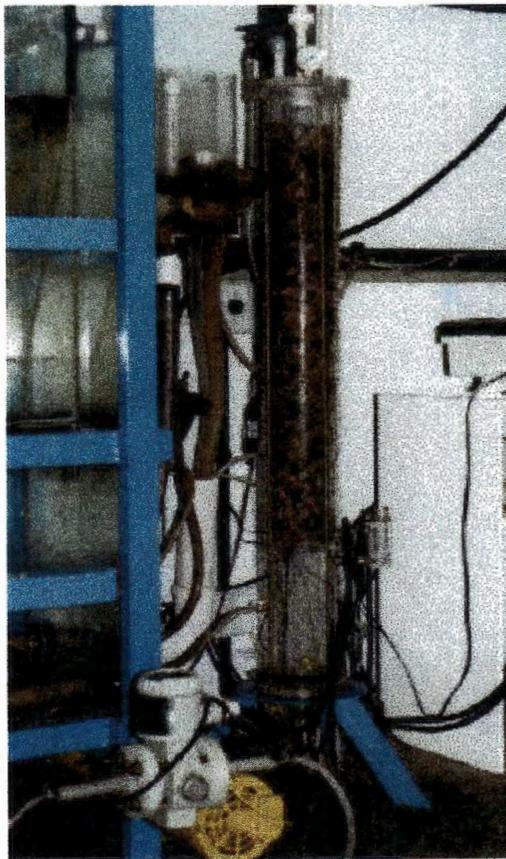


FIGURA 13 - Fotografia da câmara de saturação e medidor da vazão de recirculação.



FIGURA 14 - Fotografia do medidor da vazão afluente à instalação com escoamento contínuo, instalado à montante da unidade de floculação e fotografia dos conversores eletromagnéticos de vazão.

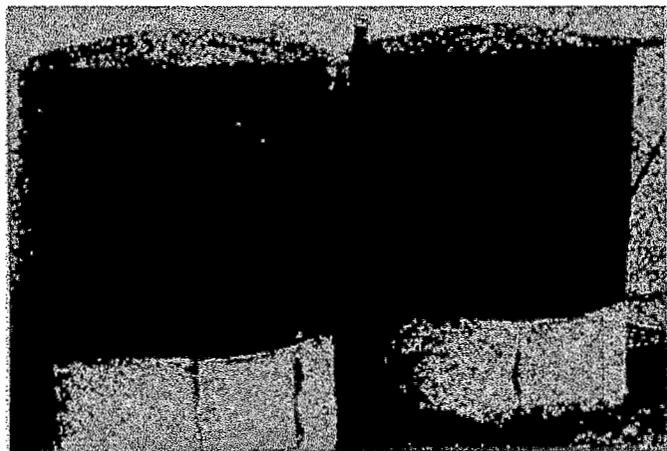


FIGURA 15 - Fotografia dos reservatórios de preparação e armazenamento da água de estudo.

#### 4.2.3 Outros equipamentos empregados

Durante a realização dos ensaios, além das instalações e equipamentos mencionados, foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais:

- a) Equipamento utilizado para realizar a mistura rápida (*jar test*, figura 16) dos ensaios feitos no reator estático porque verificou-se (através de ensaio com traçador) que os agitadores do flotatesto não promoviam mistura rápida adequada devido a configuração dos mesmos. Os jarros desse equipamento são bequers com estatores e capacidade útil de 2 litros. O gradiente de velocidade médio da mistura rápida foi definido a partir da rotação do agitador e temperatura da água conforme proposto por AZEVEDO NETTO et al. (1987).
- b) potenciômetro, marca Hach, modelo 43800-00 (figura 16)
- c) turbidímetro, marca Hach, modelo 2100P (figura 16)
- d) espectrofotômetro, marca Bausch & Lomb, modelo 601
- e) tacômetro, marca Deumo, capacidade de 16 a 2000 rpm
- f) cronômetro
- g) centrífuga, marca Fanem, modelo 43800-00
- h) condutivímetro, marca Metrohm Herisau, modelo E382

- i) aquecedor de aquário
- l) vidrarias diversas

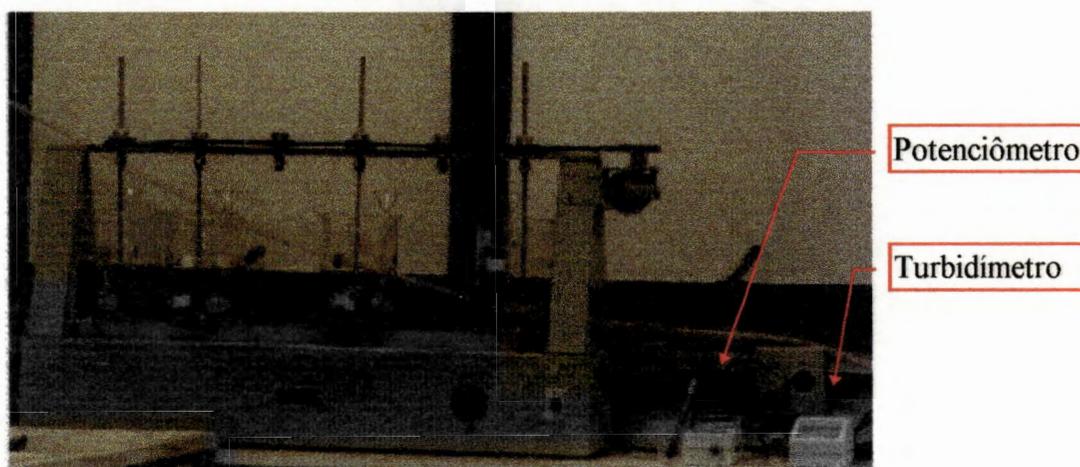


FIGURA 16 - Fotografia do equipamento utilizado para promover a mistura rápida dos ensaios realizados no reator estático, potenciômetro e turbidímetro.

### 4.3 Águas de estudo

Conforme já mencionado, dois tipos de água foram empregados nesta pesquisa, quais sejam:

#### 4.3.1 Água de estudo tipo I

A água tipo I foi preparada utilizando-se água proveniente do poço do campus da Escola de Engenharia de São Carlos-USP e adicionando-se a esta, ácido húmico (marca Aldrich, referência H1,675-2) à uma concentração de 4 mg/L e, aproximadamente, 2,2 mL/L de suspensão mãe de caulinita. A caulinita utilizada foi da marca Fluka, referência 60609.

A suspensão mãe de caulinita foi preparada de acordo com metodologia proposta por CAMPOS (1980) modificada em termos da concentração recomendada (300 g/L) por este autor. O procedimento seguido foi: adição de 60 g de caulinita em

14 litros de água destilada, mistura em agitação intensa por 2 horas e coleta do sobrenadante após 15 horas de repouso. Considerando que na preparação da água de estudo para realização de ensaios na instalação com escoamento contínuo, o consumo de suspensão de caulinita era relativamente alto, aproximadamente 13 L por dia de ensaio, parte da caulinita foi preparada com água do poço (utilizada na preparação da água de estudo).

A cada dia de ensaio realizado na instalação com escoamento contínuo, uma água bruta era preparada e, dessa forma, era feita caracterização desta e da água do poço através de medidas de cor, turbidez, condutividade, alcalinidade, dureza, pH e temperatura. As medidas de tais características para cada água preparada, assim como, a água do poço usada na preparação, encontram-se junto com as planilhas dos ensaios (Apêndice 2a), porém o quadro 1 apresenta a variação dessas medidas ao longo de todos os ensaios. A homogeneização e o controle da temperatura da água de estudo foram descritos no item 4.2.2, onde mencionou-se sobre os componentes da instalação com escoamento contínuo. A temperatura desses ensaios foi de  $27,4 \pm 1,1$  °C, conforme mostrado nas figuras 85 a 106 e nas tabelas 7 a 28 (Apêndice 2b).

A água de estudo utilizada nos ensaios realizados no reator estático, foi preparada em reservatório com volume útil de 200 L utilizando-se água do poço coletada em duas parcelas, visto que, a primeira parcela coletada ( $\cong 300$  L) não foi suficiente para execução de todos os ensaios. A variação das características da água de estudo e da água do poço medidas durante a realização dos ensaios no reator estático é apresentada no quadro 1. As determinações mostradas no quadro 1 foram efetuadas periodicamente (10 medidas em aproximadamente 2 meses) ao longo desses ensaios. A temperatura foi de  $25,3 \pm 1,9$  °C, sendo controlada com aquecedor de aquário ou gelo feito da própria água de estudo.

A temperatura ambiente esteve relativamente alta na época em que foram realizados os ensaios na instalação com escoamento contínuo, sendo que, em certos dias não foi possível baixar a temperatura da água, em tais ensaios, para menos que 26 °C. Assim, optou-se trabalhar com valor um pouco mais elevado da temperatura da

água dos ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo em relação a temperatura da água dos ensaios realizados no reator estático.

QUADRO 1- Características da água do poço e da água de estudo tipo I

Características	Flotatestes		Instalação c/ escoamento contínuo		
	Poço	Estudo	Poço*	Poço**	Estudo
pH	6,50 ± 0,20	6,76 ± 0,26	6,54 ± 0,15	6,25 ± 0,60	7,00 ± 0,40
Cor aparente (uC)	1 - 5	84 - 103	5 - 14	1 - 5	85 - 122
Cor verd. (uC)	-	43 - 61	-	-	42 - 66
Turbidez (uT)	0,18 - 0,78	4,47 - 8,00	0,42 - 1,09	0,15 - 0,50	5,17 - 7,56
Alcalinidade (mg/L em CaCO <sub>3</sub> )	24 - 31	24 - 33	29 - 34	24 - 30	24 - 36
Dureza (mg/L em CaCO <sub>3</sub> )	16 - 21	16 - 23	18 - 22	16 - 18	16 - 23
Condutividade (µmho/cm)	50,0 - 55,3	49,7 - 60,8	49,7 - 58,4	46,5 - 55,3	47,1 - 60,8
SST <sup>□</sup> (mg/L)	-	-	-	-	2,8 - 7,2
SSF <sup>□□</sup> (mg/L)	-	-	-	-	1,3 - 6,0
SSV <sup>□□□</sup> (mg/L)	-	-	-	-	0,3 - 3,5

\* Amostra da água do poço coletada dentro dos reservatórios de armazenamento e preparação da água de estudo.

\*\* Amostra da água do poço coletada na tubulação de entrada aos reservatórios de armazenamento e preparação da água de estudo.

□ SST: sólidos suspensos totais; □□ SSF: sólidos suspensos fixos; □□□ SSV: sólidos suspensos voláteis.

#### 4.3.2 Água de estudo tipo II

A água de estudo tipo II também foi preparada a partir da água do poço do campus da EESC-USP sendo adicionado nesta, 16 mg/L de ácido húmico (marca Aldrich, referência H1,675-2) utilizando-se as mesmas instalações citadas no item 4.3.1. As características da água tipo II e da água do poço são mostradas no quadro 2.

O controle da temperatura foi feito da mesma forma como descrita para a água tipo I, tanto nos ensaios realizados no reator estático quanto na instalação com escoamento contínuo. Nos ensaios realizados no reator estático e na instalação com

escoamento contínuo, a temperatura da água de estudo foi de  $21,8 \pm 1,5$  °C e  $26,1 \pm 1,0$  °C, respectivamente. Como aconteceu com os ensaios da água tipo I, durante os ensaios na instalação com escoamento contínuo a temperatura da água tipo II não pôde ser reduzida abaixo de 25 °C, conforme mostrado nas figura 124 a 127 e tabelas 32 a 35 (Apêndice 4b).

QUADRO 2- Características da água do poço e da água de estudo tipo II

Características	Flotatestes		Instalação c/ escoamento contínuo	
	Estudo	Poço*	Poço*	Estudo
pH	7,21**	6,30**		$6,61 \pm 0,37$
Cor aparente (uC)	263**	3**		258 - 281
Cor verdadeira (uC)	-	-		233 - 244
Turbidez (uT)	4,65**	0,24**		4,19 - 5,07
Alcalinidade (mg/L em CaCO <sub>3</sub> )	-	28		29 - 34
Dureza (mg/L em CaCO <sub>3</sub> )	-	16		16 - 24
Condutividade (µmho/cm)	60,0**	47,4 - 51,4		49,3 - 64,6
SST <sup>□</sup> (mg/L)	-	-		3,3 - 4,4
SSF <sup>□□</sup> (mg/L)	-	-		0,5 - 1,6
SSV <sup>□□□</sup> (mg/L)	-	-		2,8

\* Amostra da água do poço coletada na tubulação de entrada aos reservatórios de armazenamento e preparação da água de estudo.

\*\* Medida efetuada uma vez.

□ SST: sólidos suspensos totais; □□ SSF: sólidos suspensos fixos; □□□ SSV: sólidos suspensos voláteis

#### 4.4 Correlação entre valores de cor e absorvância

As medidas de cor foram obtidas a partir de leituras de absorvância realizadas em espectrofotômetro (Bausch & Lomb, 601) a um comprimento de onda de 400 nm com cubeta de 100 mm de percurso ótico. A relação entre valores de cor e absorvância foi obtida através do seguinte procedimento:

- preparação de padrões de cor, em mg/L de PtCo ou uC, de acordo com recomendações apresentadas em APHA (1992);
- preparação de soluções de ácido húmico a concentrações de 0,10, 0,25, 0,50, 0,75, 1,0, 2,0, 3,0, 3,5, 4,0, 4,5, 5,0 6,0, 7,0, 8,0 9,0 e 10,0 mg/L para pH= 6, pH= 7 e pH= 8, visto que o pH influencia diretamente na cor;
- comparação visual entre os padrões de cor e as soluções de ácido húmico,
- leitura da absorbância no espectrofotômetro para as diversas soluções de ácido húmico.

Assim, após comparar soluções de ácido húmico para pH de 6, 7 e 8 com os padrões de cor e correlacionar os valores de cor das soluções com os valores de absorbância, chegou-se a três curvas e suas respectivas equações, relacionando cor e absorbância, mostradas na figura 21 (item 5.1).

#### **4.5 Produtos químicos utilizados**

Nos ensaios realizados com a água tipo I, foi utilizado sulfato de alumínio comercial como coagulante e para variação do pH de coagulação, foram utilizados ácido clorídrico P.A. e carbonato de sódio (barrilha) comercial. Nos ensaios realizados com a água tipo II, utilizou-se sulfato de alumínio P.A. como coagulante, carbonato de sódio P.A. e ácido clorídrico P.A. para promover a variação do pH de coagulação na etapa de ensaios efetuados no reator estático. Para a etapa executada na instalação com escoamento contínuo com a água tipo II foram utilizados sulfato de alumínio e barrilha comercial como coagulante e alcalinizante, respectivamente.

Em todos os ensaios realizados no reator estático, as soluções de sulfato de alumínio, barrilha e ácido clorídrico foram preparadas com água destilada a 0,5% a cada 48 horas, exceto a solução de ácido clorídrico que foi preparada semanalmente.

Nos ensaios da água tipo I executados na instalação com escoamento contínuo, as soluções de sulfato de alumínio foram preparadas de 0,25 a 0,50% e as soluções de barrilha de 0,12 a 0,24%, considerando a dosagem de sulfato de alumínio (DSA) requerida, pH de coagulação, limitações da bomba dosadora utilizada e a

magnitude da vazão afluyente. Para os ensaios da água tipo II, a concentração das soluções de sulfato de alumínio e de barrilha foram de 0,25 a 0,28% e 0,25 a 0,27%, respectivamente, considerando a DSA, pH de coagulação, vazão afluyente e limitações da bomba dosadora.

#### **4.6 Ensaios realizados com o reator estático de floculação-flotação por ar dissolvido (flotateste) e a água tipo I**

Essa parte da pesquisa seguiu seis etapas, as quais são ilustradas em um fluxograma, figura 17, e descritas nos itens 4.6.2 a 4.6.7.

##### **4.6.1 Procedimento e monitoramento dos ensaios**

O procedimento seguido para a realização dos ensaios no reator estático é descrito a seguir, sendo que os parâmetros operacionais usados em cada etapa são apresentados esquematicamente na figura 17 e serão descritos mais adiante (itens 4.6.2 a 4.6.7):

- abria-se o registro 1 para permitir entrada de água da torneira na câmara de saturação e, simultaneamente, coletava-se amostra para medida da turbidez. Descartava-se essa água caso o valor da turbidez fosse maior que, aproximadamente, 0,3 uT;
- ligava-se o compressor de ar e, através de registros, controlava-se a entrada e saída de ar na câmara de saturação de maneira que a pressão na câmara fosse de 441 kPa;
- mantinha-se por 8 minutos a passagem de ar comprimido através da água contida na câmara de saturação à pressão de 441 kPa.
- após esse período, abriam-se os registros de agulha que controlam a entrada da água saturada nos jarros do flotateste, deixando passar certo volume da mesma, para que ficasse nas mangueiras a água saturada na câmara, fechando-os em seguida. Durante esse procedimento, evitava-se a alteração da pressão na câmara de saturação. A seguir, fechava-se a entrada e a saída de ar na câmara, verificando-se a pressão;

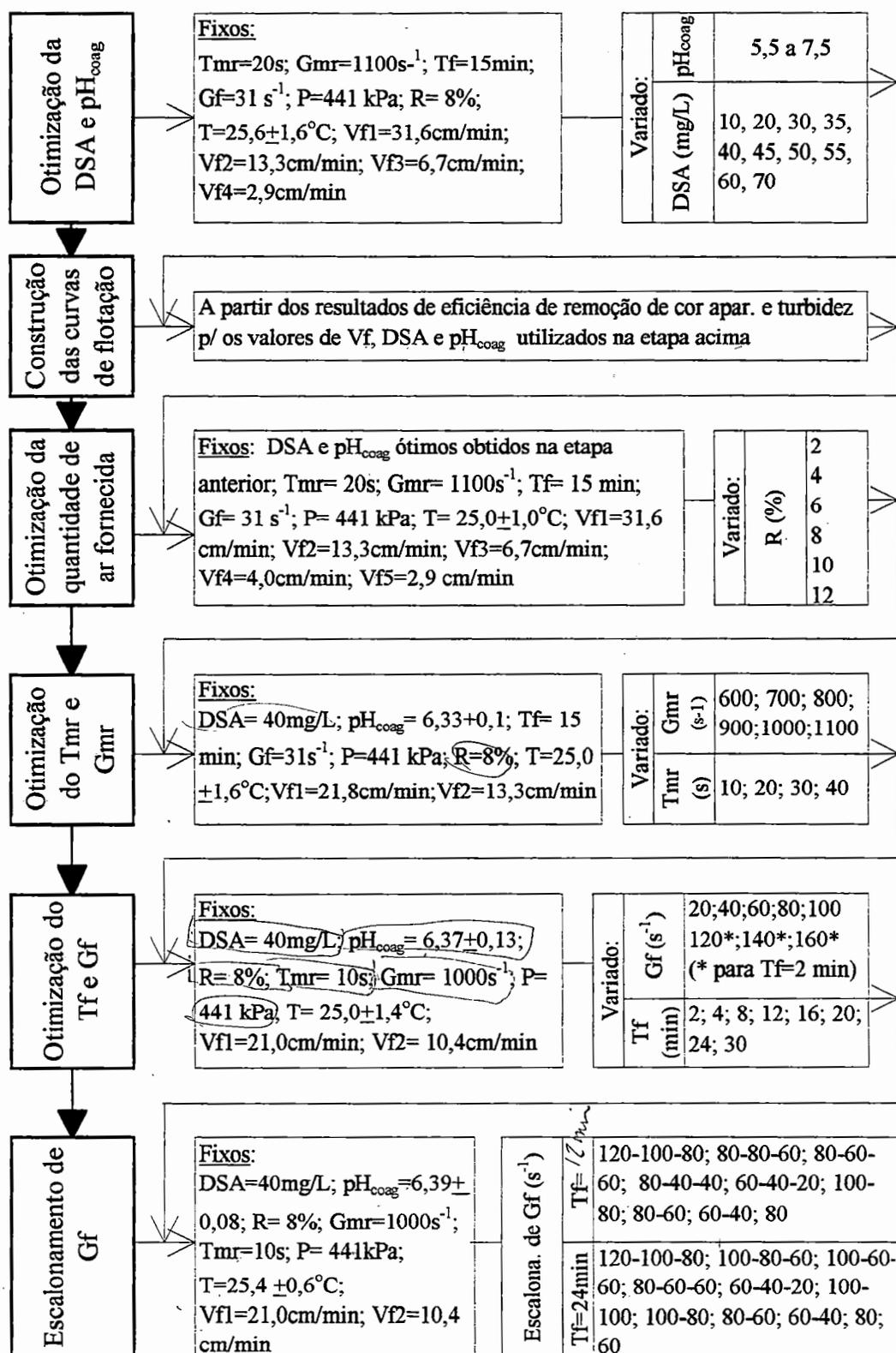


FIGURA 17 - Fluxograma das etapas de ensaios realizados com o flotatestes para a água tipo I.

- homogeneizava-se a água de estudo e coletava-se amostra representativa para caracterização da mesma;
- ajustava-se a temperatura, caso necessário;
- mediam-se 2 litros da água para cada jarro, utilizando-se proveta;
- colocava-se a água nos jarros do *jar test*, ligando o agitador e acertando a rotação de maneira a obter-se o gradiente de velocidade médio de mistura rápida (Gmr) desejado;
- adicionava-se determinado volume de solução de ácido clorídrico ou de barrilha de maneira a conferir a variação desejada do pH de coagulação ( $\text{pH}_{\text{coag}}$ ) para cada dosagem de sulfato de alumínio (DSA);
- media-se o volume da solução de coagulante, utilizando pipeta, de modo a obter-se a DSA fixada, e colocava-se o mesmo em béquer;
- adicionava-se o conteúdo do béquer no jarro, cronometrando o tempo para controle do tempo da mistura rápida (Tmr). Desligava-se o agitador ao término do Tmr, coletava-se uma amostra em béquer de 50 mL e media-se o pH e a temperatura;
- transferia-se 1810 mL da água coagulada para o jarro do flotateste, ligando o agitador e acertando a rotação para obter-se o gradiente de velocidade médio de floculação (Gf) a ser estudado, cronometrando o tempo para controle do tempo de floculação (Tf);
- após o término de Tf, desligava-se o agitador e, dentro do menor tempo possível, retirava-se o agitador do jarro com cuidado para não quebrar flocos e, em seguida, abria-se o registro de agulha, permitindo a entrada de um volume pré-fixado de água previamente saturada à 441 kPa, fechando o registro após ser atingido tal volume. Simultaneamente à entrada de água saturada, acionava-se o cronômetro para controle do tempo de flotação ou da velocidade de flotação fixada em cada ensaio.
- em torno de 10 segundos antes da coleta da amostra, eram descartados aproximadamente 5 mL abrindo-se a pinça que mantinha fechada a mangueira de uma tomada para coleta;
- coletava-se cerca de 30 mL da amostra em uma tomada localizada a 20 cm da base do jarro, durante 2 segundos antes e 2 segundos depois do tempo de flotação previsto;

- media-se turbidez e cor aparente das amostras coletadas após coagulação-floculação-flotação.

Para todas as amostras coletadas foi considerada a diluição das mesmas causada pela água de recirculação. Embora não seja cientificamente correto a utilização da fórmula de diluição para parâmetros como cor e turbidez, esta foi aplicada simplificada visto a impraticabilidade de outro método pelo grande número de amostras e acreditando-se na importância de considerar tal diluição.

#### **4.6.2 Ensaio visando a otimização da dosagem de coagulante e pH de coagulação**

Nesta etapa foram utilizadas diferentes dosagens de sulfato de alumínio para diferentes valores de pH de coagulação. As dosagens de sulfato de alumínio empregadas foram 10, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 e 70 mg/L para valores de pH de coagulação entre 5,5 e 7,5. Os demais parâmetros operacionais foram fixados, sendo:  $T_{mr} = 20$  s,  $G_{mr} = 1100$  s<sup>-1</sup>,  $T_f = 15$  min,  $G_f = 31$  s<sup>-1</sup>,  $P = 441$  kPa,  $R = 8\%$ ,  $V_{f1} = 31,6$  cm/min,  $V_{f2} = 13,3$  cm/min,  $V_{f3} = 6,7$  cm/min e  $V_{f4} = 2,9$  cm/min. Na figura 17, apresentada anteriormente, é mostrado um esquema desta etapa.

#### **4.6.3 Construção das curvas de flotação**

As curvas de flotação foram construídas a partir dos resultados de eficiência de remoção de cor aparente e turbidez obtidos na etapa anterior. Cada par de DSA e  $pH_{coag}$  produziu uma curva com 4 pontos referentes as quatro velocidades de flotação utilizadas em tal etapa.

As curvas de flotação permitem avaliar a velocidade ascensional dos flocos formados em diferentes condições de coagulação-floculação. Assim, quanto maior a velocidade de flotação, maior poderá ser a taxa de aplicação superficial (TAS) em uma unidade de flotação, para uma determinada eficiência de remoção.

Para a construção das curvas de flotação foi utilizada metodologia proposta por REALI (1991).

#### **4.6.4 Ensaios visando a otimização da quantidade de ar fornecida**

A partir das duas etapas anteriores, foi definida uma dosagem de sulfato de alumínio com seu respectivo pH ótimo de coagulação, os quais foram utilizados nesta etapa e nas posteriores.

A variação da quantidade de ar fornecida para a flotação ( $Sp^*p$ ) foi produzida pela variação da taxa de recirculação ( $R$ ), medida em percentual do volume de água contida no jarro de flotação (1810 mL). Foram utilizados valores de taxa de recirculação de  $R=2\%$ ,  $R=4\%$ ,  $R=6\%$ ,  $R=8\%$ ,  $R=10\%$  e  $R=12\%$ . Nesses ensaios foram mantidos constantes os seguintes parâmetros:  $T_{mr}=20$  s,  $G_{mr}=1100$   $s^{-1}$ ,  $T_f=15$  min,  $G_f=31$   $s^{-1}$ ,  $P=441$  kPa,  $V_{f1}=31,6$  cm/min,  $V_{f2}=13,3$  cm/min,  $V_{f3}=6,7$  cm/min,  $V_{f4}=4,0$  cm/min,  $V_{f5}=2,9$  cm/min.

#### **4.6.5 Ensaios visando a otimização do tempo e do gradiente de velocidade médio de mistura rápida**

Nesta etapa foram utilizados dosagem de coagulante e pH de coagulação e taxa de recirculação definidos anteriormente. Outros parâmetros mantidos constantes foram:  $T_f=15$  min,  $G_f=31$   $s^{-1}$ ,  $P=441$  kPa,  $V_{f1}=21,8$  cm/min e  $V_{f2}=13,3$  cm/min.

Cada ensaio foi realizado para diferentes valores de tempo da mistura rápida ( $T_{mr}$ ) e gradiente médio de mistura rápida ( $G_{mr}$ ). Foram investigados  $T_{mr}$  de 10, 20, 30 e 40 s para valores de  $G_{mr}$  de 600, 700, 800, 900, 1000 e 1100  $s^{-1}$ .

#### **4.6.6 Ensaios visando a otimização do tempo e do gradiente de velocidade médio da floculação**

Os ensaios executados neste estágio visaram adequar o tempo de floculação ( $T_f$ ) e o gradiente de velocidade médio de floculação ( $G_f$ ) sendo aplicados valores de  $T_f$  de 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 30 minutos para valores de  $G_f$  de 20, 40, 60, 80 e 100  $s^{-1}$ .

<sup>1</sup>. Para  $T_f = 2$  min, além dos valores de  $G_f$  mencionados, foram feitos ensaios com  $G_f$  de 120, 140 e 160  $s^{-1}$ .

Os demais parâmetros operacionais foram mantidos constantes e definidos nas etapas anteriores (itens 4.6.2 a 4.6.5), com exceção dos valores de velocidade de flotação, que nestes ensaios foram fixados em  $V_{f1} = 21,0$  cm/min e  $V_{f2} = 10,4$  cm/min.

#### **4.6.7 Ensaios visando avaliação da influência do escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação na eficiência da flotação**

Esta etapa refere-se à investigação de diferentes valores de  $G_f$  ao longo do tempo de floculação. Dois valores de  $T_f$  foram definidos, a partir da etapa anterior, para serem efetuados com diferentes escalonamentos do  $G_f$ . Os demais parâmetros aplicados foram os mesmos utilizados na etapa anterior.

A escolha dos diferentes escalonamentos de  $G_f$  foi efetuada da seguinte forma:

i) dois níveis de  $G_f$  foram escolhidos aleatoriamente, sendo um relativamente alto e outro relativamente baixo; ii) o nível de gradiente mais alto foi, inicialmente, de 120-100-80  $s^{-1}$  para três câmaras de floculação e 100-80  $s^{-1}$  para duas câmaras de floculação; iii) o nível de gradiente mais baixo foi de 60-40-20  $s^{-1}$  e 60-40  $s^{-1}$  para três e duas câmaras de floculação, respectivamente; iv) um terceiro nível de  $G_f$  foi definido a partir de metodologia proposta por PÁDUA (1994) para ensaios de sedimentação, descrita a seguir:

- a) Execução dos ensaios de floculação em reatores estáticos e montagem de uma tabela e de figura, para cada gradiente de velocidade e tempo de floculação, com os resultados de turbidez remanescente correspondente à velocidade de sedimentação a ser estudada.
- b) Determinação, para o tempo  $T_f/m$ , do gradiente de velocidade médio de floculação correspondente à menor turbidez remanescente ( $N$ ), sendo  $T_f$  o tempo de floculação otimizado no reator estático e  $m$  o número de câmaras da unidade de floculação de mistura completa com escoamento contínuo. Este será o gradiente na primeira câmara de floculação.

- c) Como a água que chega à segunda câmara encontra-se pré-floculada pela passagem na câmara antecedente, é feita a determinação, para cada um dos gradientes de velocidade médios de floculação estudados, do tempo ( $T_f$ ) que corresponde à turbidez residual ( $N$ ), determinada para a câmara antecedente, fazendo-se interpolação caso necessário. Soma-se a este tempo o valor  $T_f/m$  (tempo teórico de detenção em cada câmara) e determina-se, por interpolação, a turbidez remanescente ( $N$ ) correspondente a este novo tempo. O gradiente de velocidade médio de floculação que apresentar o menor valor de  $N$  será adotado para a segunda câmara.
- d) Repetição do procedimento do item c até se obter o valor de  $G_f$  para a última câmara da unidade de floculação.

Tal metodologia foi aplicada para os ensaios de flotação, sendo que a etapa de ensaios de floculação (item 4.6.6) foi realizada para duas velocidades de flotação. Tais ensaios foram monitorados pela determinação da turbidez e cor aparente das amostras. Os valores de gradiente de velocidade médio de floculação definidos pela referida metodologia são apresentados no quadro 3.

QUADRO 3 - Escalonamentos do gradiente de velocidade médio de floculação para 3 e 2 câmaras de floculação definidos a partir da metodologia proposta por PÁDUA (1994) considerando cor aparente e turbidez remanescentes e dois valores de velocidade de flotação.

Variáveis consideradas		Cor aparente	Turbidez
Tf= 24 min	Vf= 21,0 cm/min	3 câmaras	80-60-60
		2 câmaras	80-80
	Vf= 10,4 cm/min	3 câmaras	100-60-60
		2 câmaras	100-100
Tf= 12 min	Vf= 21,0 cm/min	3 câmaras	80-80-60
		2 câmaras	80-60
	Vf= 10,4 cm/min	3 câmaras	80-40-40
		2 câmaras	80-80

Como mostrado no quadro 3, os valores de gradiente de velocidade médio de floculação mudaram em função da velocidade de flotação ou parâmetro medido para controle de remoção (cor aparente e turbidez) para alguns casos. Então todos os valores de Gf apresentados no quadro 3 e os escolhidos aleatoriamente, conforme mencionado anteriormente, foram aplicados em ensaios realizados com o flotateste. A partir desses resultados foram escolhidos os diferentes escalonamentos do Gf para serem aplicados na instalação com escoamento contínuo (item 4.7).

#### **4.7 Ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo e água tipo I**

A partir dos resultados dos ensaios realizados com o reator estático, onde foi variado o gradiente de velocidade médio de floculação ao longo do tempo de floculação, item 4.6.7, foi escolhido um escalonamento de Gf para cada tempo e número de câmaras de floculação estudados, em função da metodologia proposta por PÁDUA (1994); outros dois níveis foram definidos aleatoriamente conforme já mencionado. O quarto escalonamento de Gf foi definido como tendo valores de Gf constantes nas duas ou três câmaras. Ou seja, para  $T_f = 24$  min e  $T_f = 12$  min, foram investigados, na instalação com escoamento contínuo, quatro níveis de escalonamento de Gf para três e duas câmaras de floculação, exceto para  $T_f = 12$  min com duas câmaras de floculação, onde os resultados sugeriram um quinto nível de Gf ( $140-120$   $s^{-1}$ ). Os valores de Gf testados na instalação com escoamento contínuo em função do tempo e do número de câmaras de floculação são mostrados no quadro 4.

A variação do tempo de floculação para o mesmo número de câmaras de floculação, assim como a manutenção do tempo de floculação para uma, duas ou três câmaras de floculação, foram obtidas através da variação da vazão afluyente, (ver quadro 4). Desta forma, para que a velocidade de escoamento entre as placas ( $V_{placas}$ ), número de Reynolds (Rey) e/ou a taxa de aplicação superficial aparente ( $TAS_{ap}$ ) na câmara de flotação fossem mantidas constantes para os diversos ensaios; um certo número de espaçamentos entre as placas foram fechados. Os espaçamentos entre as placas foram fechados colocando-se tiras de borracha na parte superior e placas de

QUADRO 4 - Ensaio programados com a instalação com escoamento contínuo para a água tipo I. Parâmetros mantidos constantes: DSA e pH de coagulação: valores ótimos obtidos nos ensaios preliminares com o flotatest; T= 27,4 ± 1,1°C, P= 441 ± 5 kPa, Sp\*p: em torno de 4 g de ar/m<sup>3</sup> de água.

Tf (min)	24			12		12		
TAS <sub>ap</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	358 ± 1			363 ± 5		714 ± 6		
V <sub>placas</sub> (cm/min)	31			31 a 32		62 a 63		
Nº Reynolds	367 ± 1			372 ± 5		732 ± 6		
Câmaras de floc.	3	2	1	2	1	3	2	1
Gf (s <sup>-1</sup> )	60-60-60 (A2) 80-60-60 (A1) 120-100-80 (A3) 60-40-20 (A4) 60-60-60 (A2)	100-80 (B1) 80-60 (B2) 60-40 (B3) 60-60 (B4)	60 (C1)	100-80 (D1) 80-60 (D2) 60-40 (D3) 80-80 (D4) 80-60 (D2) 60-40 (D3) 120-100 (D5) 100-80 (D1) 140-120 (D6) 100-80 (D1) 120-100 (D5)	80 (E1)	80-40-40 (F1) 120-100-80 (F2) 60-40-20 (F3) 80-80-80 (F4) 80-40-40 (F1) 120-100-80 (F2) 80-40-40 (F1) 120-100-80 (F2)	80-60 (G1) 80-80 (G2) 100-80 (G3) 60-40 (G4) 120-100(G5)	80 (H1)
(nº do ensaio)								
Vazão afl. <sup>1</sup> (L/h)	≈ 850	≈ 565	≈ 283	≈ 1130	≈ 283	≈ 1700	≈ 1130	≈ 565
Vazão recir.(L/min)	0,708 ± 0,008	0,469 ± 0,016	0,243 ± 0,016	0,951 ± 0,019	0,471 ± 0,005	1,419 ± 0,019	0,947 ± 0,013	0,473 ± 0,007
Espaç. Abertos	3	2	1	4	2	3	2	1

QUADRO 4 - Continuação

Tf (min)	8		4
TAS <sub>ap</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	**358, *537 ± 6		***425, ** 531, *720
V <sub>placas</sub> (cm/min)	**31, *46 a 47		***37, ** 46, *63
Nº Reynolds	**367; *551 ± 6		***435, ** 545, *738
Câmaras de floc.	2	1	1
Gf (s <sup>-1</sup> )	80-80 (I1*)	80 (J1**)	80 (L3***)
(nº do ensaio)	80-80 (I1*)	80 (J2*)	80(L2**) 80 (L1*)
Vazão afl. (L/h)	≈ 1700	≈ 850	≈ 1700
Vazão recir.(L/min)	1,418 ± 0,011	0,711 ± 0,011	1,409 ± 0,016
Espaç. Abertos	4	**3, *2	***3, **4, *5

<sup>1</sup> Vazão afl.: vazão afluyente da água de estudo;

\* ; \*\* Ref. aos ensaios com Tf= 8min e 2 e 3 espaçamentos abertos entre as placas na câmara de flotação, respectivamente;

\* ; \*\* ; \*\*\* Ref. aos ensaios com Tf= 4min e 5, 4 e 3 espaçamentos abertos entre as placas na câmara de flotação, respectivamente.

isopor, cortadas com o mesmo ângulo de inclinação das placas, colocadas na parte frontal. Porém, conforme mostrado na figura 11, o módulo apresenta 5 espaçamentos. Tal fato representou uma das limitações para a execução de determinados ensaios, por exemplo, para  $T_f = 12$  min e  $TAS_{ap} \cong 360 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ , não foi possível fazer ensaio com três câmaras de floculação, pois seriam necessários 6 espaçamentos para a manutenção da  $TAS_{ap}$ . Por esse motivo, foram feitos ensaios para  $T_f = 12$  min para uma  $TAS_{ap} \cong 710 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$  de maneira que pudessem ser usadas três, duas ou uma câmara, mantendo-se constante a  $TAS_{ap}$ .

O quadro 4 mostra todos os ensaios realizados com a água tipo I na instalação com escoamento contínuo, variação do escalonamento do Gf e número de câmaras de floculação para  $T_f = 24$  min e  $T_f = 12$  min e os diversos parâmetros operacionais envolvidos. Alguns ensaios foram feitos para tempo de floculação de 8 e 4 min com poucas variações, em função do limite da bomba de recalque da vazão afluente, número de espaçamentos entre as placas ( $TAS_{ap}$ ) na câmara de flotação e volume disponível da água de estudo.

#### **4.7.1 Procedimento e monitoramento realizados na instalação com escoamento contínuo**

Em todas as carreiras de operação da instalação com escoamento contínuo, o lodo acumulado na superfície total da zona de separação da câmara de flotação, foi removido ao término de cada carreira para evitar que a camada fosse quebrada no decorrer dos ensaios. Para tanto, os ensaios foram agrupados de acordo com o número de espaçamentos abertos entre as placas inclinadas na câmara de flotação; de maneira que não fosse necessário abrir ou fechar espaçamentos durante cada carreira de operação. A duração de cada carreira de operação foi definida em função do volume disponível da água de estudo (5800 litros) e da vazão afluente utilizada. Assim, para a realização de todos os ensaios (Quadro 4), foram efetuadas 22 carreiras de operação na instalação com escoamento contínuo sendo que em cada carreira foram executados de 1 a 3 ensaios, em função da disponibilidade da água de estudo.

Antes da realização de cada carreira de operação, a água de estudo era preparada com, no mínimo, 12 horas de antecedência, sendo agitada continuamente durante esse período. O módulo de placas inclinadas na câmara de flotação era preparado de modo que determinado número de espaçamentos entre as placas fossem abertos ou devidamente fechados. Em função do número de câmaras que eram utilizadas na unidade de floculação, a passagem ou as passagens entre as câmaras eram fechadas. Previamente ao início de uma carreira de operação, eram realizados pelo menos três ensaios no reator estático para definir o pH ótimo para cada água preparada.

Após preparadas as soluções de sulfato de alumínio e barrilha, era dado início à uma carreira de operação. Inicialmente era ajustada a vazão da água de estudo, em seguida a vazão da solução de sulfato de alumínio e da solução de barrilha. Após, era acertado o número de rotações dos agitadores na unidade de floculação para produzir os valores de  $G_f$  a serem estudados. Em seguida era ajustada a pressão na câmara de saturação, controlando a entrada e a saída de ar e água e a vazão de recirculação.

Em todos os ensaios foi utilizada a mesma pressão na câmara de saturação, a qual manteve-se em  $441 \pm 5$  kPa. A vazão de recirculação foi variada em função da variação da vazão afluyente de maneira que a quantidade de ar fornecida ( $Sp \cdot p$ ) ficasse em torno de 4 g de ar por  $m^3$  de água de água bruta. Tal valor de  $Sp \cdot p$  foi definido a partir dos resultados apresentados em REALI & MARCHETTO (1996).

A partir de ensaios realizados com a mesma câmara de saturação empregada na presente pesquisa, SANTOS (1995)<sup>1</sup> definiu a eq. (8) para determinar a concentração média de ar dissolvido/liberável em função da pressão relativa (P) na referida câmara:

$$Sp = 0,18496 \times P \quad (8)$$

---

<sup>1</sup> SANTOS, S. P. dos (1995). (USP. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento). Comunicação pessoal.

Em que:

$Sp$  = concentração de ar, massa de ar por volume de água pressurizada, para uma dada pressão de saturação e temperatura de 25 °C ( $ML^{-3}$ )

$P$  = pressão relativa na câmara de saturação ( $ML^{-1}T^{-2}$ )<sup>1</sup>

A quantidade de ar,  $Sp \cdot p$ , foi determinada através da eq. (9), definida pelo balanço de massa mostrado na figura 18:

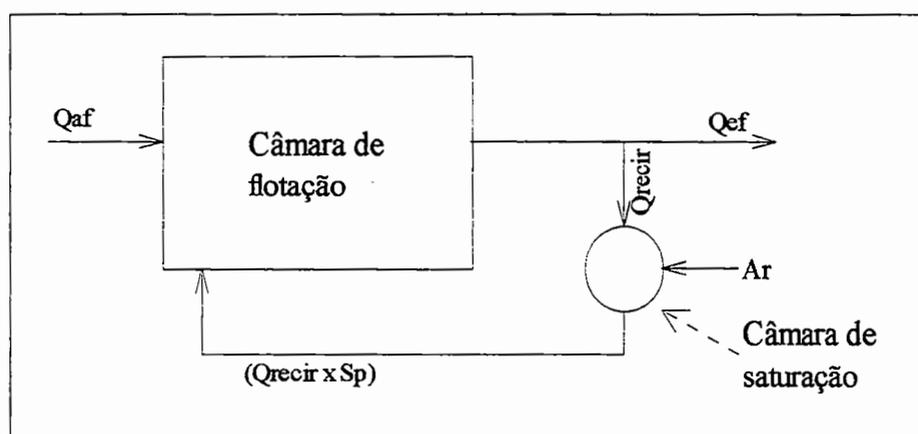


FIGURA 18 - Esquema da quantidade de ar fornecida para a flotação,  $Sp \cdot p$ .

De acordo com a figura 18, tem-se:

$$Sp \cdot p = \frac{(Q_{af} \times Sp_{af}) + (Q_{recir} \times Sp)}{Q_{af}} \quad (9)$$

Em que:

$Sp \cdot p$  = quantidade de ar fornecida para flotação, isto é, massa de ar por volume de água bruta, sendo que a vazão de água bruta foi considerada como a vazão da água de estudo mais a vazão dos produtos químicos ( $ML^{-3}$ )

<sup>1</sup> P em kPa.

$Q_{af}$  = vazão afluente à câmara de flotação, isto é, vazão da água de estudo mais vazão dos produtos químicos, ( $L^3T^{-1}$ )

$Sp_{af}$  = concentração de ar da vazão afluente à câmara de flotação ( $ML^{-3}$ )

$Q_{recir}$  = vazão de recirculação ( $L^3T^{-1}$ )

$Sp$  = concentração de ar, massa de ar por volume de água pressurizada, referente a uma dada temperatura e pressão de saturação da câmara de saturação usada ( $ML^{-3}$ )

Considerando que:  $Sp_{af} = 0$ ;

$$r = \frac{Q_{recir}}{Q_{af}}$$

Então, a partir da eq. (9), tem-se:

$$Sp * p = \frac{Q_{recir} \times Sp}{Q_{af}}$$

$$Sp * p = r \times Sp \tag{10}$$

Substituindo-se  $Sp$ , conforme a eq. (8):

$$Sp * p = r \times 0,18496 \times P \tag{11}$$

Em que:

$Sp * p$  = quantidade de ar fornecida para flotação ( $ML^{-3}$ )

Conforme mencionado, a equação definida para cálculo de  $Sp$  (eq.(8)), foi determinada para temperatura de 25 °C. Dessa forma, o cálculo de  $Sp * p$  através da eq. (11) foi corrigido em função da temperatura da água de estudo considerando a

solubilidade do ar na água, de acordo com WEAST (1989). Os valores do fator de correção da temperatura são mostrados no Apêndice 5.

Para o cálculo da  $TAS_{ap}$ ,  $V_{placas}$  e  $Rey$  na câmara de flotação, foi considerada a vazão afluyente total, ou seja, vazão da água de estudo, vazão dos produtos químicos e vazão de recirculação, utilizando-se as equações (12), (13) e (14), respectivamente.

$$TAS_{ap} = \frac{Q_{af.total}}{A_{placas}} \quad (12)$$

Em que:

$TAS_{ap}$  = taxa de aplicação superficial ( $L^3L^{-2}T^{-1}$ );

$Q_{af.total}$  = vazão da água de estudo + vazão da água de recirculação + vazão dos produtos químicos ( $L^3T^{-1}$ );

$A_{placas}$  = área em planta entre as placas ( $L^2$ )

$$V_{placas} = \frac{Q_{af.total}}{A_{frontal}} \quad (13)$$

Em que:

$V_{placas}$  = velocidade média de escoamento entre as placas ( $LT^{-1}$ )

$A_{frontal}$  = área frontal entre as placas, perpendicular à inclinação das mesmas ( $L^2$ )

$$Rey = \frac{V_{placas} \times 4Rh}{\nu} \quad (14)$$

Em que:

$Rey$  = número de Reynolds

Rh= raio hidráulico (L)

v= viscosidade cinemática da água ( $L^2T^{-1}$ ).

O monitoramento dos ensaios foi realizado através das seguintes medidas:

- pH, temperatura, turbidez, cor aparente, cor verdadeira, alcalinidade, dureza, condutividade, SST, SSF e SSV da água de estudo;
- pH, temperatura, turbidez, cor aparente, alcalinidade, dureza e condutividade da água do poço utilizada para preparação da água de estudo;
- pH e temperatura de amostras de água coagulada a cada 15 minutos, após o início das carreiras de operação;
- turbidez, SST e cor aparente da água clarificada a cada 15 minutos;
- turbidez, SST, SSF e SSV da água floculada ao final de cada ensaio;
- cor aparente, cor verdadeira, turbidez, SST, SSF e SSV da água clarificada ao fim de cada ensaio;
- medida da pressão de saturação e vazão de recirculação a cada 15 minutos.

A amostra da água de estudo era coletada em três alíquotas ao longo de uma carreira de operação, configurando uma amostra composta. As determinações de SST, SSF e SSV da água clarificada ao final de cada ensaio, foram feitas em duplicata, sendo que os resultados apresentados referem-se a uma média aritmética. Os resultados apresentados de SST, SSF e SSV da água floculada em cada carreira de operação, representam uma média aritmética das determinações de SST, SSF e SSV da água floculada feitas ao final de cada ensaio, nos casos em que foram feitos mais de um ensaio por carreira de operação. Tais resultados foram utilizados para calcular as eficiências de remoção de SST, SSF e SSV obtidas para cada ensaio.

#### **4.8 Ensaio realizado com o reator estático de floculação-floação por ar dissolvido (flotateste) e a água tipo II**

Inicialmente foram realizados ensaios visando a obtenção da dosagem e pH adequados à coagulação. Testou-se DSA de 20, 25, 30, 40, 50, 60 e 70 mg/L e  $pH_{coag}$

entre 5,2 e 7,2 para ensaios de coagulação-floculação-flotação e ensaios de coagulação-floculação-sedimentação. Para os dois tipos de ensaios foram mantidos constantes os seguintes parâmetros:  $T_{mr} = 20$  s,  $G_{mr} = 800$  s<sup>-1</sup>,  $T_f = 15$  min,  $G_f = 31$  s<sup>-1</sup>. Outros parâmetros mantidos constantes nos ensaios de clarificação por flotação foram:  $P = 441$  kPa,  $R = 8\%$  e  $V_f = 16,25$  cm/min. A velocidade de sedimentação ( $V_s$ ) utilizada foi de 1,5 cm/min.

Na etapa seguinte, foram realizados ensaios para obtenção de curvas de flotação e curvas de sedimentação. As curvas de flotação foram obtidas para  $DSA = 25$  mg/L,  $DSA = 30$  mg/L,  $DSA = 50$  mg/L e  $DSA = 70$  mg/L, com seus respectivos valores ótimos de pH de coagulação. As curvas de sedimentação foram obtidas para  $DSA = 25$  mg/L,  $DSA = 30$  mg/L e  $DSA = 50$  mg/L, com seus respectivos valores ótimos de pH de coagulação. Os parâmetros operacionais utilizados foram os mesmos da etapa anterior tanto para os ensaios de coagulação-floculação-flotação quanto para os ensaios de coagulação-floculação-sedimentação, exceto pelos valores de  $V_f$  e  $V_s$ . As amostras foram coletadas com velocidade de 50, 30, 20, 15, 12, 8 e 4 cm/min nos ensaios de flotação e 10,9, 9,6, 8,6, 7,7, 4,0, 2,6, 1,3 e 0,3 cm/min nos ensaios de sedimentação.

Outra série de ensaios foi realizada para o caso de clarificação por flotação onde a taxa de recirculação foi variada de 5, 8, 11 e 14% para  $DSA = 30$  mg/L e  $DSA = 70$  mg/L com seus respectivos valores de pH ótimo de coagulação. O tempo e gradiente de velocidade médio de mistura rápida, tempo e gradiente de velocidade médio de floculação, pressão de saturação e velocidades de flotação foram iguais aos utilizados na etapa de ensaios realizados para obtenção das curvas de flotação. Na figura 19 é apresentado um fluxograma das fases dos ensaios realizados.

#### 4.8.1 Procedimento e monitoramento dos ensaios

Todos os ensaios de flotação correspondentes aos ensaios de sedimentação para as mesmas condições operacionais foram realizados simultaneamente.

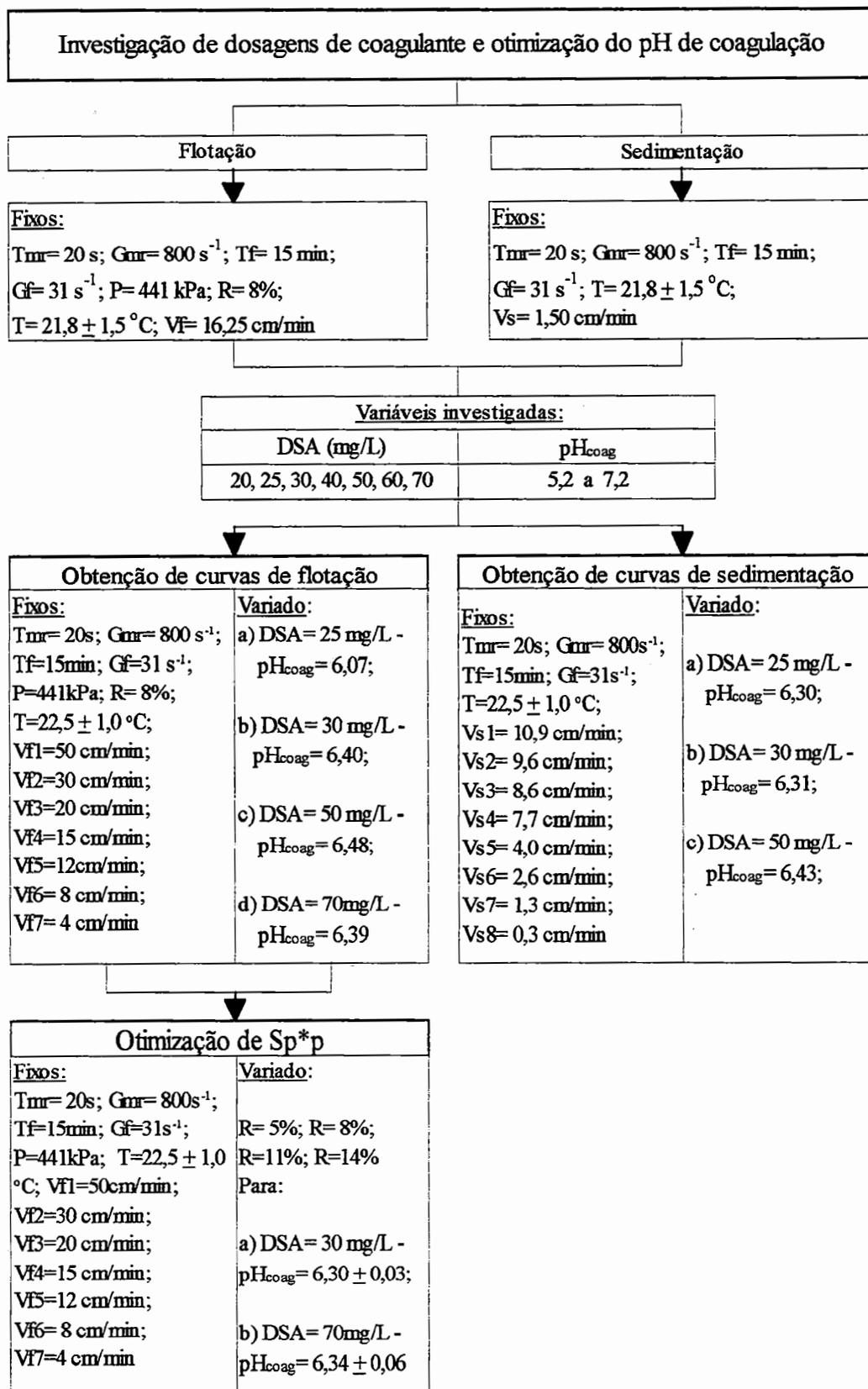


FIGURA 19 - Fluxograma dos ensaios realizados com o flotatestes para a água tipo II.

Para os ensaios de coagulação-floculação-flotação, foi utilizado o mesmo procedimento descrito no item 4.6.1 exceto pela tomada usada para coleta das amostras. Na primeira etapa, as amostras foram coletadas a 32,5 cm a partir da base dos jarros. Nos ensaios realizados para obtenção das curvas de flotação e os de variação da taxa de recirculação, as amostras foram coletadas em mais de uma tomada para tempos de flotação que configurassem as velocidades de flotação estabelecidas.

Os ensaios de coagulação-floculação-sedimentação também foram realizados no flotatestes porém, para o cálculo da velocidade de sedimentação, foi considerado a metade do desnível após cada coleta.

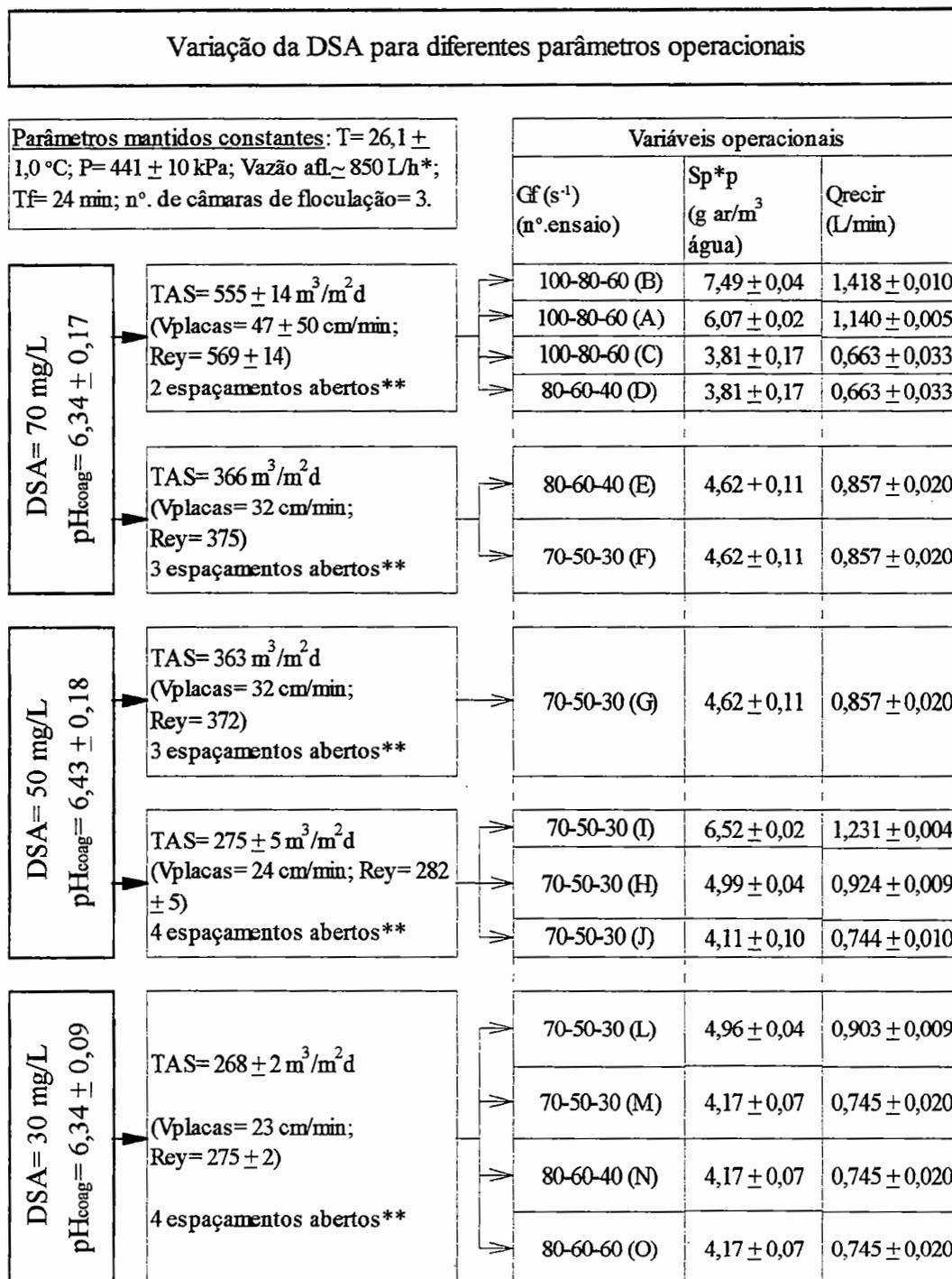
Da mesma forma que nos ensaios da água tipo I, o monitoramento foi realizado através de medidas de pH e temperatura da água coagulada e turbidez e cor aparente da água clarificada, sendo que a turbidez da água clarificada foi determinada apenas nos ensaios visando otimização da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação.

#### **4.9 Ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo e água tipo II**

Em função dos resultados obtidos nos ensaios realizados no flotatestes com a água tipo II, foram executados ensaios na instalação com escoamento contínuo para DSA= 70 mg/L com  $\text{pH}_{\text{coag}} = 6,31 \pm 0,14$ , DSA= 50 mg/L com  $\text{pH}_{\text{coag}} = 6,37 \pm 0,11$  e DSA= 30 mg/L com  $\text{pH}_{\text{coag}} = 6,34 \pm 0,10$ . Em todos os ensaios foram mantidos constantes os seguintes parâmetros: pressão na câmara de saturação=  $441 \pm 10$  kPa, tempo teórico de floculação= 24 min e número de câmaras de floculação= 3. Para cada DSA foram testados diferentes valores de  $\text{TAS}_{\text{ap}}$ , escalonamento de Gf e  $\text{Sp}^*p$ , conforme mostra o esquema apresentado na figura 20. Conforme já comentado, os ensaios realizados com a água tipo II foram efetuados em parceria com a engenheira Margarida Marchetto. Assim, a discussão dos resultados obtidos será feita de acordo com os objetivos principais de cada trabalho. Então, embora a figura 20 apresente todos os parâmetros investigados, no presente trabalho, a discussão será em função

dos resultados obtidos pela variação de parâmetros relacionados à floculação. Os parâmetros relacionados à flotação, tais como  $TAS_{ap}$  e  $Sp^*p$ , são discutidos em MARCHETTO (1996).

O procedimento para execução dos ensaios, assim como, o monitoramento dos mesmos foram efetuados da mesma forma como descrito para os ensaios da água tipo I (item 4.7.1).



\*Vazão afl.: vazão afluyente da água de estudo

\*\*espaçamentos abertos entre as placas na câmara de flotação

FIGURA 20 - Esquema dos ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo e água tipo II.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Curvas de correlação entre valores de cor e absorvância

Na figura 21 são mostradas as curvas obtidas, com as respectivas equações, de correlação entre valores de cor aparente e os de absorvância para valores de pH de 6, 7 e 8. Nota-se que o valor da cor aparente é mais elevado com o aumento do valor do pH, o que está de acordo com o mencionado por APHA (1992).

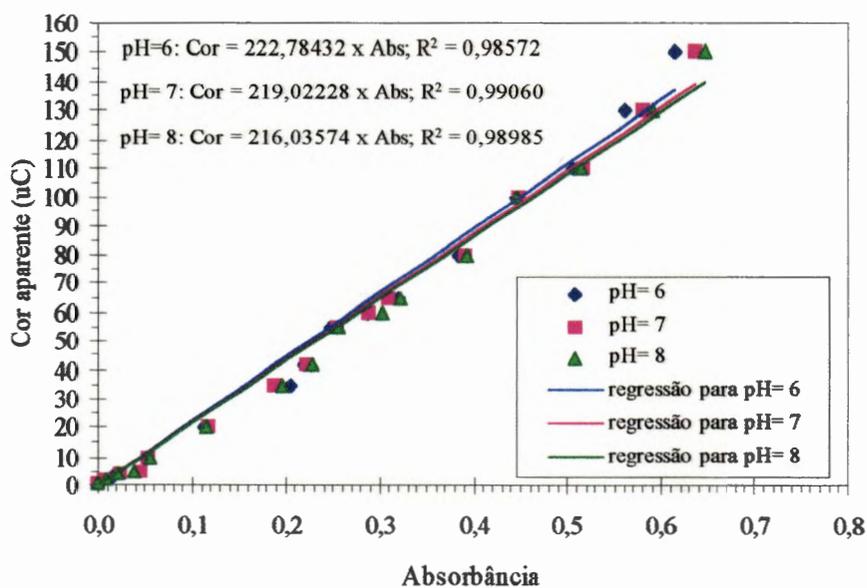


FIGURA 21 - Correlação entre valores de cor aparente e absorvância para pH= 6, pH= 7 e pH= 8.

## **5.2 Resultados dos ensaios realizados utilizando-se o reator estático de floculação-flotação por ar dissolvido (flotateste) e a água tipo I**

Todos os resultados apresentados neste item (5.2) sob a forma de gráficos, são apresentados em tabelas do Apêndice 1.

### **5.2.1 Otimização da dosagem de coagulante e pH de coagulação, utilizando-se o equipamento de flotateste e água tipo I**

As figuras 22 a 41, a seguir, apresentam valores de cor aparente e turbidez remanescentes em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio (DSA) de 10, 20, 30, 35, 40, 45 50, 55, 60 e 70 mg/L. As amostras foram coletas para quatro valores de velocidade de flotação ( $V_f$ ), sendo: 31,6 cm/min (455 m/d); 13,3 cm/min ( $\cong$ 191 m/d); 6,7 cm/min ( $\cong$  96 m/d) e 2,9 cm/min ( $\cong$  42 m/d). A coleta de amostras para quatro valores de velocidade de flotação teve o intuito de melhor representar os resultados, assim como, construir as curvas de flotação, as quais são apresentadas nas figuras 42 a 61. Os demais parâmetros operacionais utilizados durante a execução desses ensaios foram mantidos constantes e iguais a: tempo de mistura rápida ( $T_{mr}$ ) = 20 s, gradiente de velocidade médio de mistura rápida ( $G_{mr}$ ) =  $1100 \text{ s}^{-1}$ , tempo de floculação ( $T_f$ ) = 15 min, gradiente de velocidade médio de floculação ( $G_f$ ) =  $31 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação ( $P$ ) = 441 kPa e fração de recirculação ( $R$ ) = 8% (em volume).

De acordo com REALI (1991), as curvas de flotação (figuras 42 a 61) permitem avaliar a velocidade ascensional dos flocos formados em diferentes condições de coagulação/floculação. Quanto maior a velocidade de flotação, maior poderá ser a taxa de aplicação superficial em uma unidade de flotação em escala real, para uma determinada eficiência de remoção. Dessa forma, na análise das curvas de flotação (figuras 42 a 61), consideram-se melhores as condições de ensaio que resultaram em curvas com menores valores de “fração com velocidade menor que a estabelecida” (eixo das ordenadas).

Analisando-se as figuras 22 a 61 foram definidas faixas de valores ou um valor de pH ótimo de coagulação, os quais são apresentados no quadro 5. Os resultados de remoção apresentados no quadro 5 foram calculados a partir das curvas de flotação contidas nas figuras 42 a 61, sendo que levou-se em conta a remoção da fração de flocos flotando com velocidade menor que a considerada.

QUADRO 5 - Resumo dos resultados obtidos durante os ensaios realizados no flotatestes para otimização da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação, utilizando-se a água tipo I

DSA (mg/L)	Faixa de pH ótimo ou pH ótimo	Faixa de eficiência de remoção de cor aparente (%)*				Faixa de eficiência de remoção de turbidez (%)*				Referente às figuras números
		Vel. de flotação (cm/min)				Vel. de flotação (cm/min)				
		31,6	13,3	6,7	2,9	31,6	13,3	6,7	2,9	
10	6,32-6,50	37,8- 38,4	69,1- 71,3	78,1- 78,8	78,1- 79,8	30,6- 43,7	65,3- 74,6	71,8- 76,2	72,8- 76,4	22 e 42; 23 e 43
20	5,98	69,6	87,7	90,2	90,8	71,2	89,3	91,0	91,4	24 e 44; 25 e 45
30	5,84-6,49	61,9- 67,6	80,5- 85,5	82,6- 89,5	83,0- 89,5	58,7- 70,8	82,7- 84,9	85,6- 90,4	86,4- 90,5	26 e 46; 27 e 47
35	5,84-6,17	73,2- 79,0	88,0- 92,4	89,9- 94,9	90,3- 95,1	72,6- 81,4	89,4- 92,3	91,2- 94,1	91,5- 94,0	28 e 48; 29 e 49
40	6,26	83,8	95,6	97,1	97,3	80,7	93,2	94,4	94,7	30 e 50 31 e 51
45	6,13-6,29	74,8- 76,0	90,5- 92,7	92,8- 94,4	93,2- 94,4	73,2- 75,1	89,5- 93,1	91,1- 94,1	91,5- 94,2	32 e 52; 33 e 53
50	6,01-6,22	82,8- 84,5	92,3- 95,6	93,9- 96,8	94,2- 97,1	80,3- 83,6	91,4- 92,9	93,6- 94,0	94,0- 94,4	34 e 54; 35 e 55
55	5,97-6,48	44,8- 77,4	85,7- 91,6	87,7- 93,5	88,1- 93,7	48,6- 80,6	88,5- 91,7	89,2- 93,4	89,2- 93,7	36 e 56; 37 e 57
60	6,23	87,3	93,8	94,6	94,9	84,4	91,6	92,0	92,4	38 e 58; 39 e 59
70	6,17-6,52	54,5- 83,4	87,3- 91,7	90,2- 94,3	91,3- 94,9	44,2- 81,1	84,7- 91,0	86,8- 94,4	86,9- 94,7	40 e 60; 41 e 61

\*Foi levada em conta a remoção da fração de flocos flotando com velocidade menor que a considerada.

Para  $V_f = 31,6$ , houve a maior variação da eficiência de remoção considerando valores próximos de pH de coagulação para DSA de 55 e 70 mg/L. Por exemplo, para DSA de 55 mg/L obteve-se remoção de cor aparente de 77,4% para pH = 5,97 e

remoção de 44,8% para pH= 6,48. Contudo, os resultados obtidos para Vf= 31,6 cm/min auxiliaram na análise global, sendo que as melhores eficiências de remoção de cor aparente e de turbidez foram obtidas para maiores valores de dosagem de sulfato de alumínio. Para Vf= 31,6 cm/min, obteve-se eficiência de remoção de cor aparente entre 76,0 e 87,3% e de turbidez entre 75,1 e 84,4%, para DSA de 35, 40, 45, 50, 55, 60 e 70 mg/L com respectivos valores ótimos de pH de coagulação de 5,84; 6,26; 6,29; 6,22; 5,97; 6,23 e 6,17.

Para Vf= 13,3 cm/min, obteve-se eficiência de remoção de cor aparente maior que 85% para DSA de 20 e 30 mg/L e maior que 91% para as dosagens testadas maiores ou iguais a 35 mg/L, com seus respectivos valores de pH ótimo. A eficiência de remoção de turbidez para os mesmos valores de DSA mencionados acima, ou seja, 20 e 30 mg/L e 35 a 70 mg/L, foi maior que 84% e maior que 91%, respectivamente.

Como a água de estudo apresentou cor significativamente elevada em relação à turbidez, os resultados de remoção de cor serão considerados de maior relevância para análise do desempenho da flotação.

O quadro 5 (apresentado na página anterior) contém um resumo dos resultados mostrados nas figuras 22 a 61. Verifica-se que o pH ótimo de coagulação esteve compreendido entre 5,8 e 6,5, aproximadamente, para todas as dosagens de sulfato de alumínio estudadas.

Ainda observa-se no quadro 5 algumas constatações com respeito a cor aparente, tais como:

- para DSA de 10 mg/L com pH= 6,32, obteve-se remoção igual a 78,1% para Vf até 6,7 cm/min, porém para Vf igual ou superior a 13,3 cm/min, a remoção máxima de cor aparente foi de 69,1%;
- os resultados obtidos para DSA de 20 mg/L com pH= 5,98, mostram remoção maior ou igual a 87,7% para Vf até 13,3 cm/min;
- obteve-se remoção maior que 89% para DSA de 30 mg/L com pH= 6,49 e Vf até 6,7 cm/min, sendo que para Vf de 13,3, houve remoção de 85,5%;

- a DSA de 35 mg/L com pH entre 5,84 e 6,17, proporcionou remoção maior ou igual a 88% para Vf até 13,3 cm/min, sendo que para Vf até 6,7 cm/min obteve-se remoção de 94,9% e para Vf= 2,9 cm/min obteve-se 95,1% de remoção;
- para Vf até 13,3 cm/min, obteve-se remoção igual ou superior a 91,6% para valores de DSA de 40, 45, 50, 55, 60 e 70 mg/L, sendo que para DSA de 40 e 50 mg/L, a remoção obtida foi acima de 95%;
- a DSA de 40 mg/L com pH= 6,26 apresentou a maior remoção (97,1%) para Vf= 6,7 cm/min. Para Vf= 13,3 cm/min, apresentou remoção de 95,6%, sendo a maior remoção obtida e também proporcionada pela DSA de 50 mg/L.

De maneira geral, os resultados de eficiência de remoção de cor aparente e turbidez obtidos para Vf= 6,7 cm/min, foram bastante similares aos resultados obtidos para Vf= 2,9 cm/min. A maior remoção de cor aparente, 97,3%, para Vf= 2,9 cm/min também foi obtida para DSA de 40 mg/L com pH de 6,26, sendo que a remoção de turbidez, para a referida DSA, foi de 94,7%.

Observando-se globalmente os resultados apresentados nas figuras 22 a 61, é possível escolher os valores ótimos de DSA e pH de coagulação, considerando aspectos como: eficiência de remoção obtida nas diversas velocidades de flotação e consumo de coagulante, o qual implica em gasto para aquisição do coagulante e produção de lodo. Assim, com base nos resultados apresentados em tais figuras, adotou-se DSA de 40 mg/L com pH de coagulação próximo a 6,3, para serem utilizados nas demais etapas da pesquisa.

Portanto, os resultados apresentados constataam a necessidade de determinar boas condições de coagulação para que a flotação seja efetiva, confirmando o que diversos autores tem mencionado (LONGHURST & GRAHAM, 1987; GREGORY & ZABEL, 1990; EDZWALD & WINGLER (1990); MALLEY & EDZWALD, 1991a; REALI & CAMPOS, 1995).

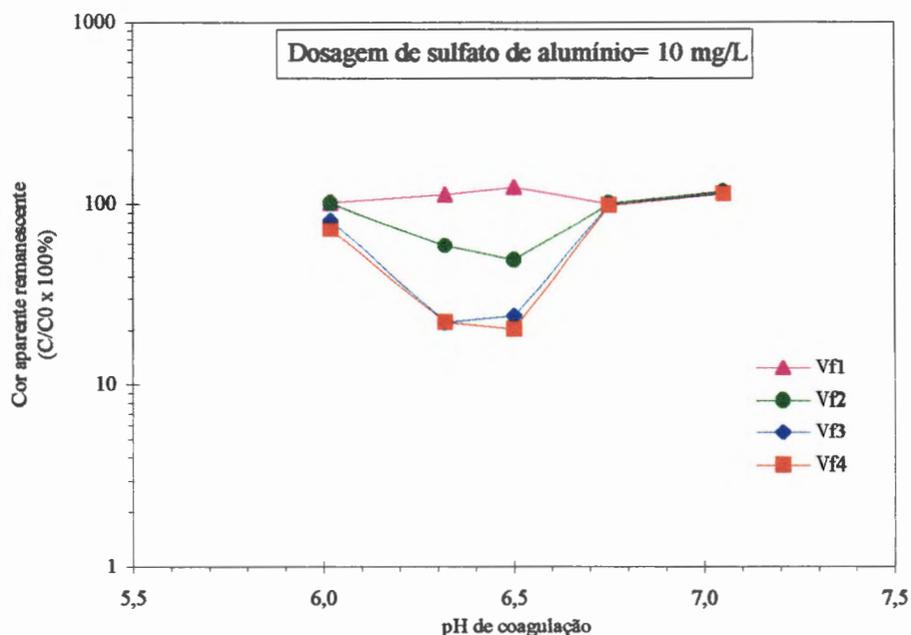


FIGURA 22 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 10 mg/L.

Ensaios realizados com o equipamento de flotateste e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6$  °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

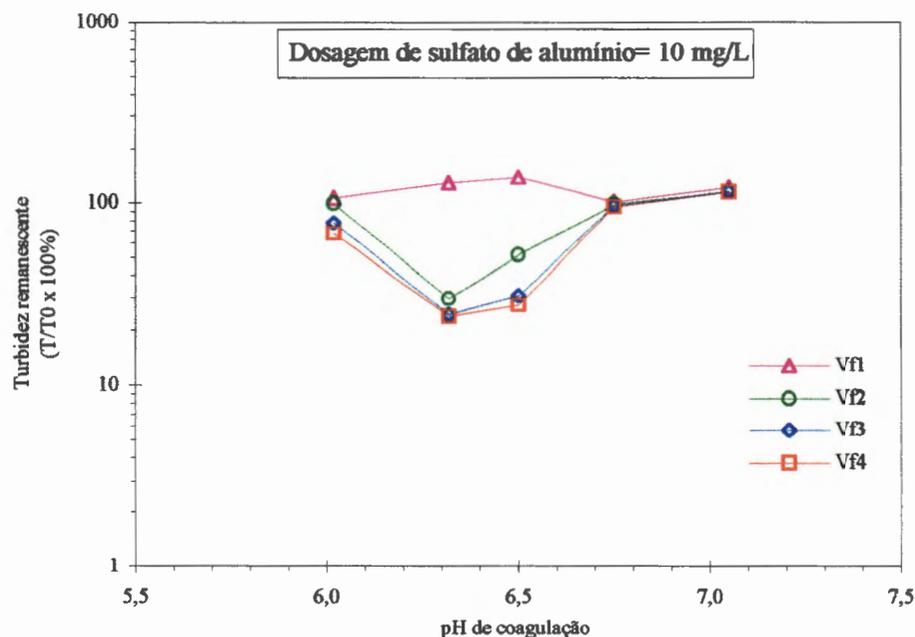


FIGURA 23 - Turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 10 mg/L.

Ensaios realizados com o flotateste e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6$  °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

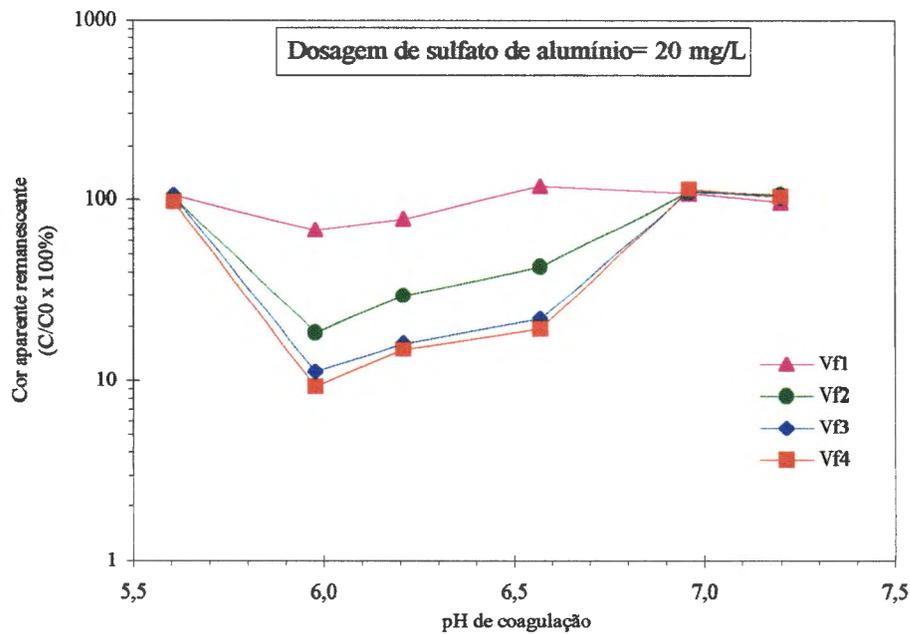


FIGURA 24 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 20 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

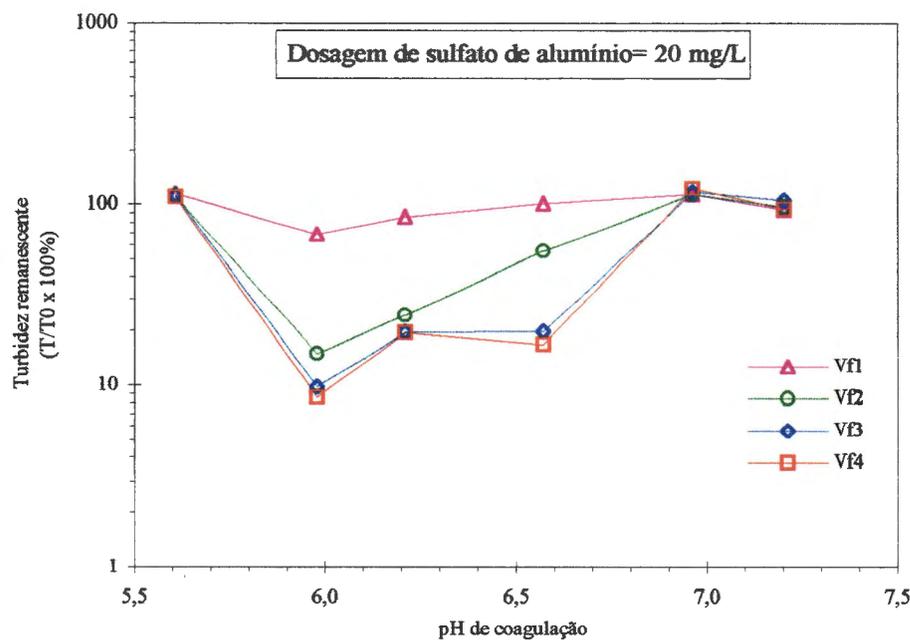


FIGURA 25 - Turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 20 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

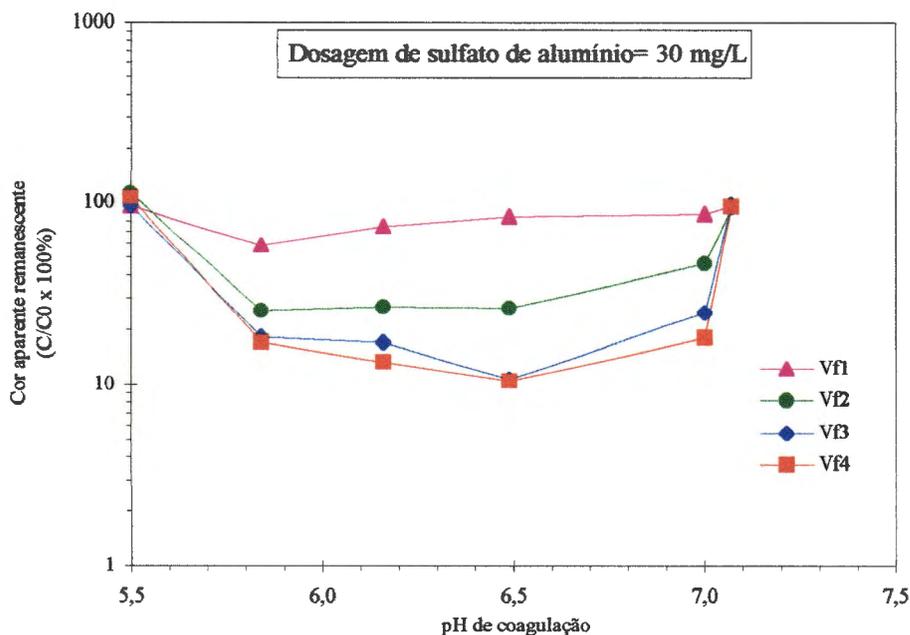


FIGURA 26 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 30 mg/L.

Ensaios realizados com o equipamento de flotateste e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6$  °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

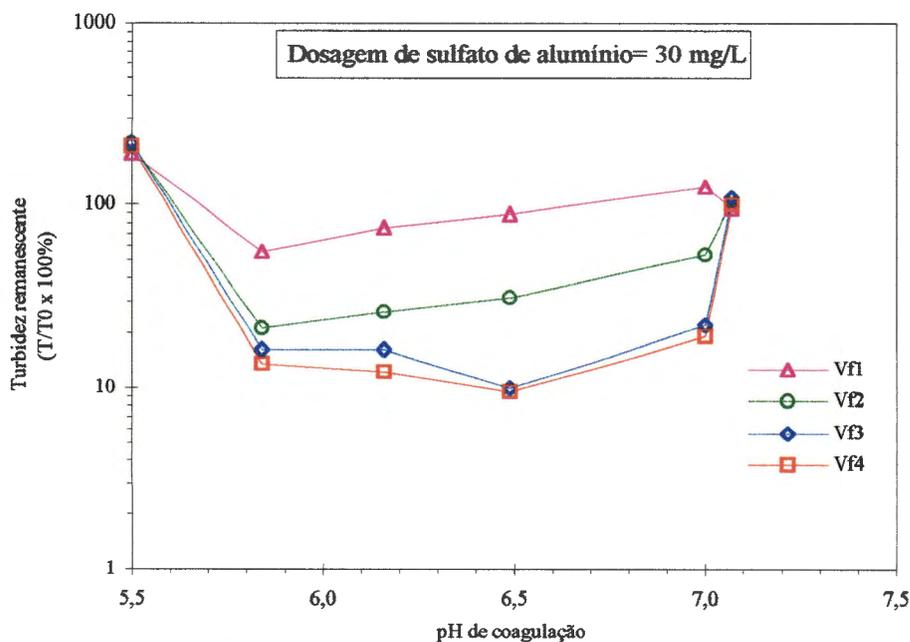


FIGURA 27 - Turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 30 mg/L.

Ensaios realizados com o equipamento de flotateste e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6$  °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

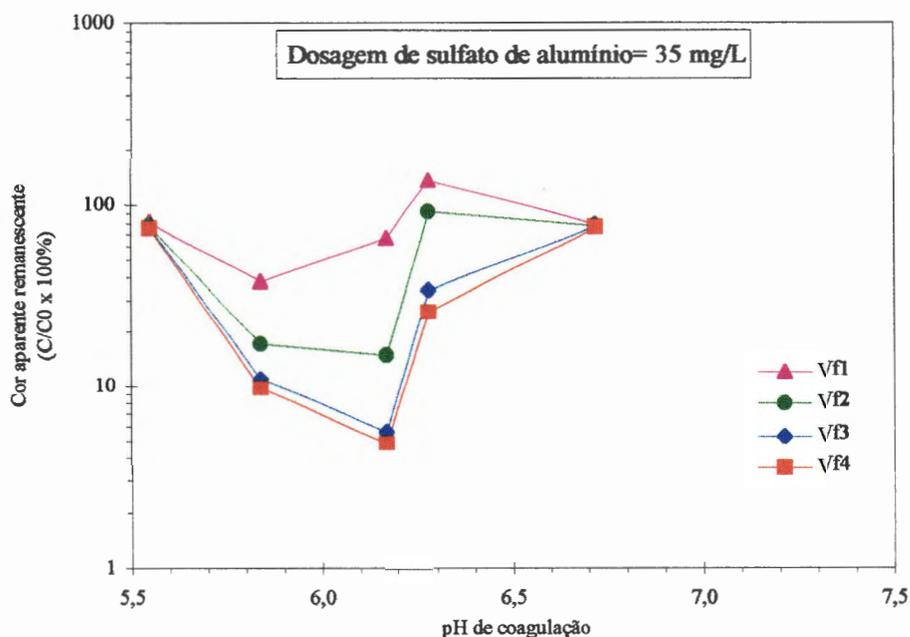


FIGURA 28 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 35 mg/L.

Ensaios realizados com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6$  °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

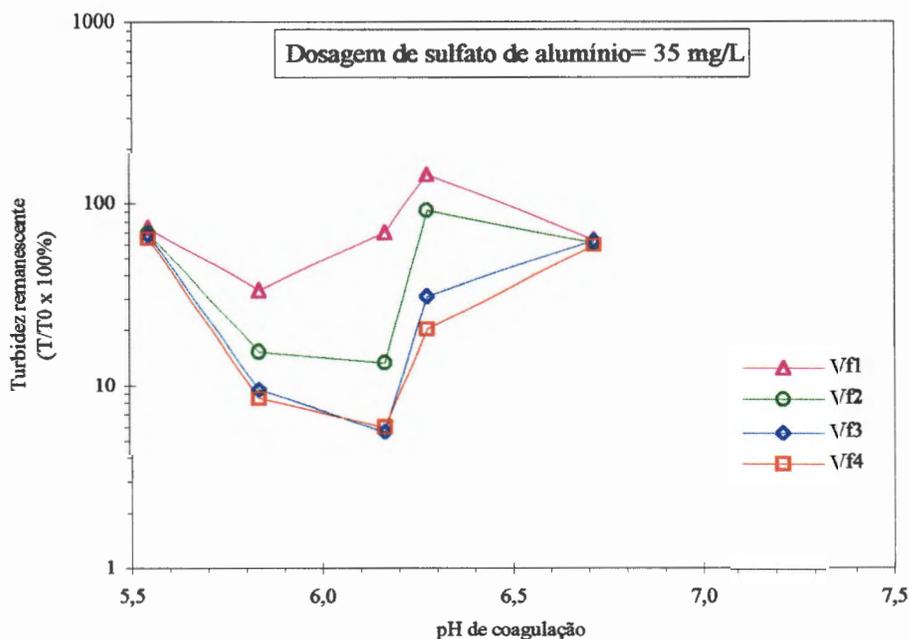


FIGURA 29 - Turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 35 mg/L.

Ensaios realizados com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6$  °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

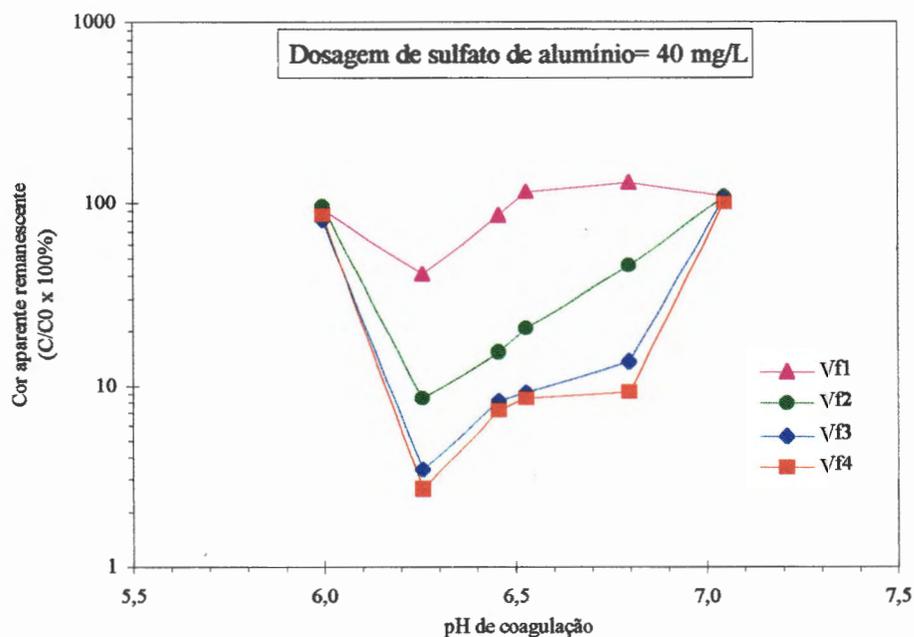


FIGURA 30 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 40 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6$  °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

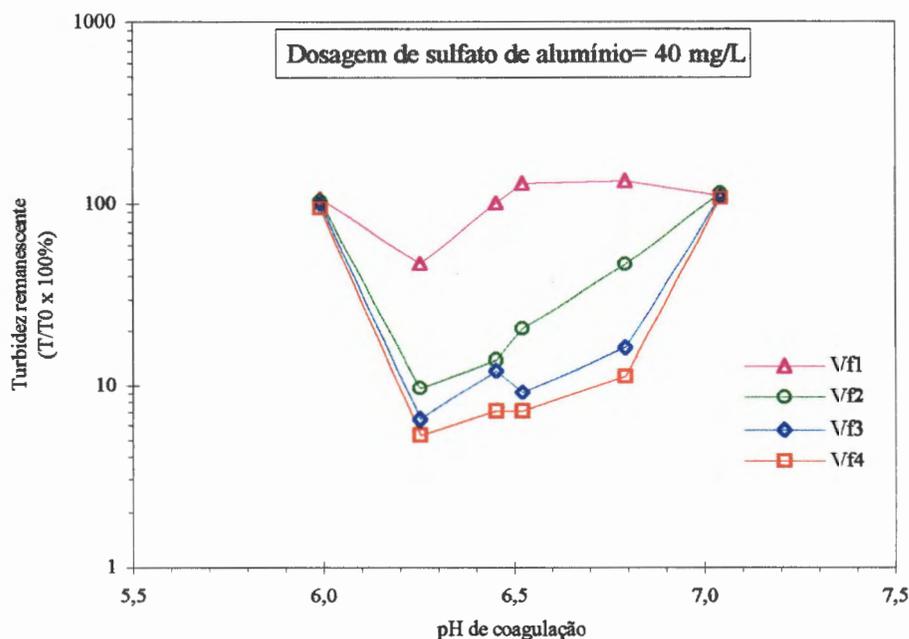


FIGURA 31 - Turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 40 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6$  °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

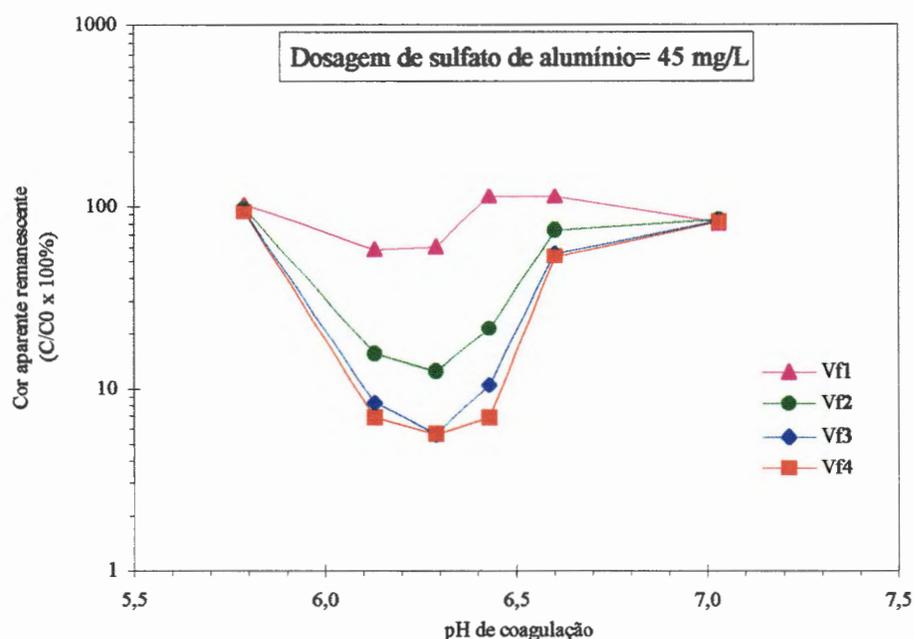


FIGURA 32 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 45 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6^\circ\text{C}$  (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

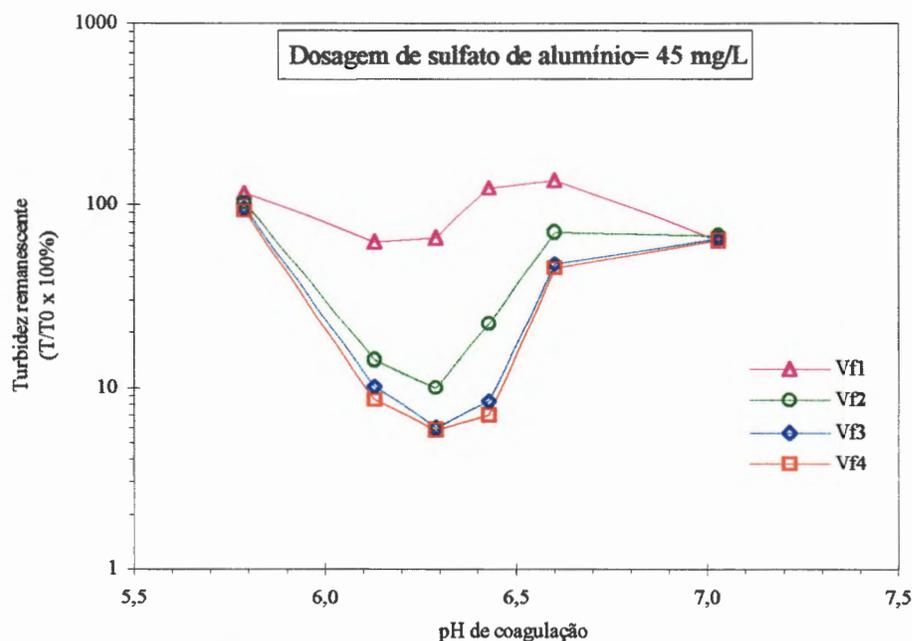


FIGURA 33 - Turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 45 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6^\circ\text{C}$  (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

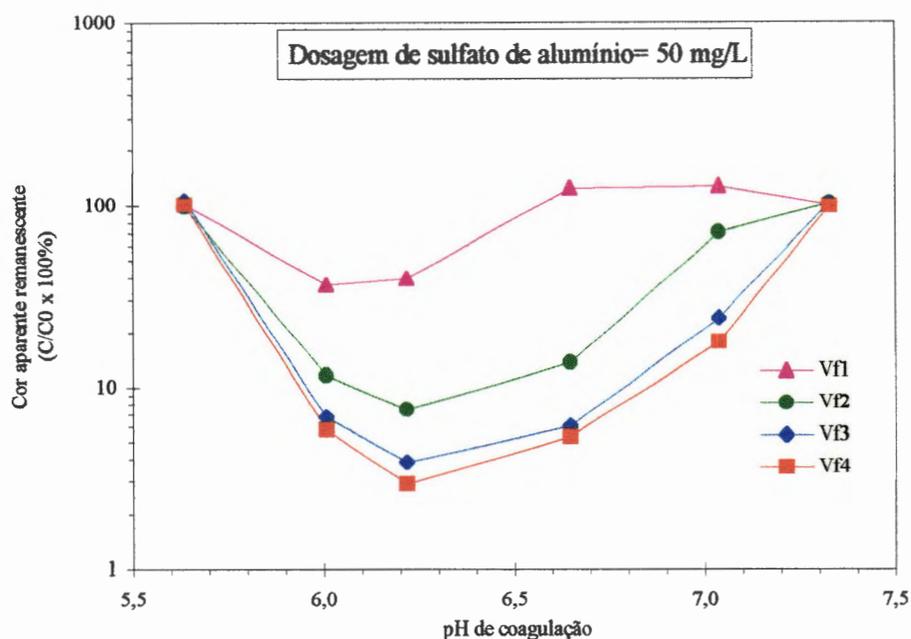


FIGURA 34 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 50 mg/L.

Ensaios realizados com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

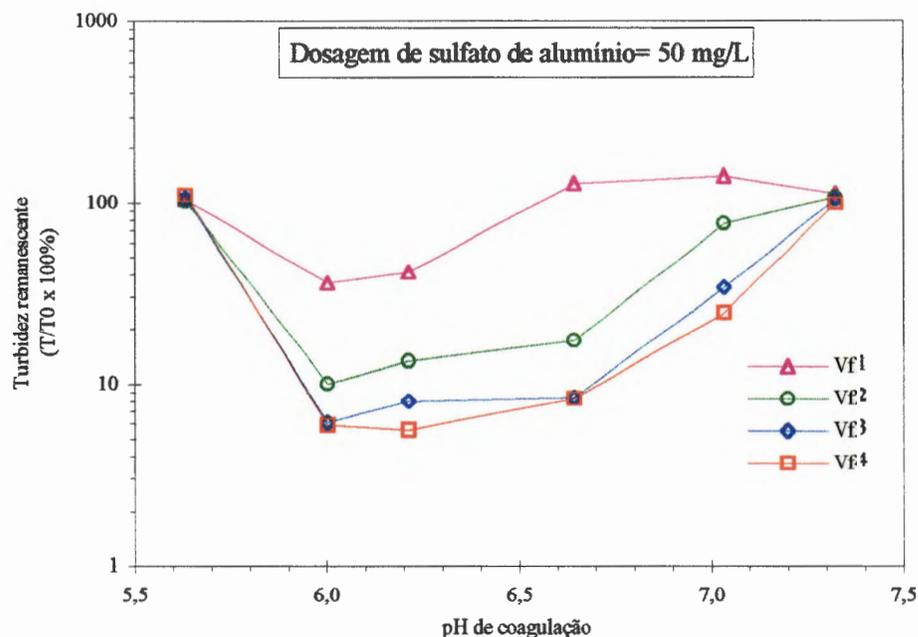


FIGURA 35 - Turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 50 mg/L.

Ensaios realizados com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

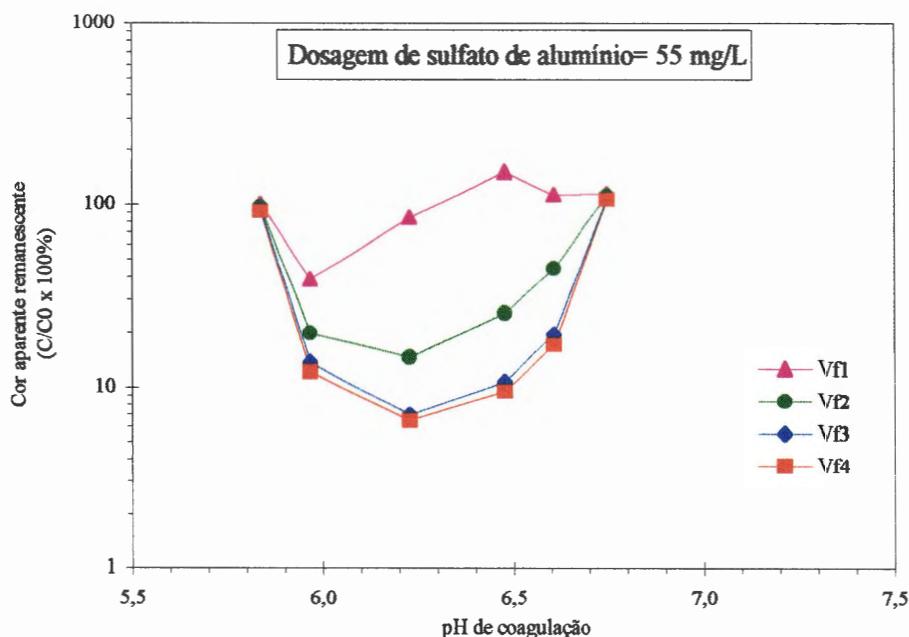


FIGURA 36 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 55 mg/L.

Ensaios realizados com o equipamento de flotateste e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6$  °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

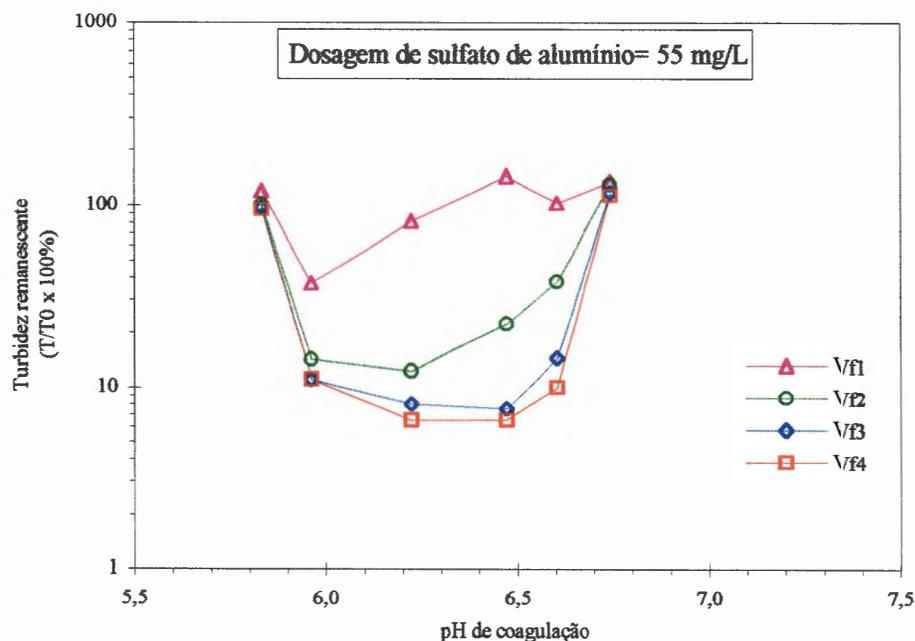


FIGURA 37 - Turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 55 mg/L.

Ensaios realizados com o equipamento de flotateste e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6$  °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

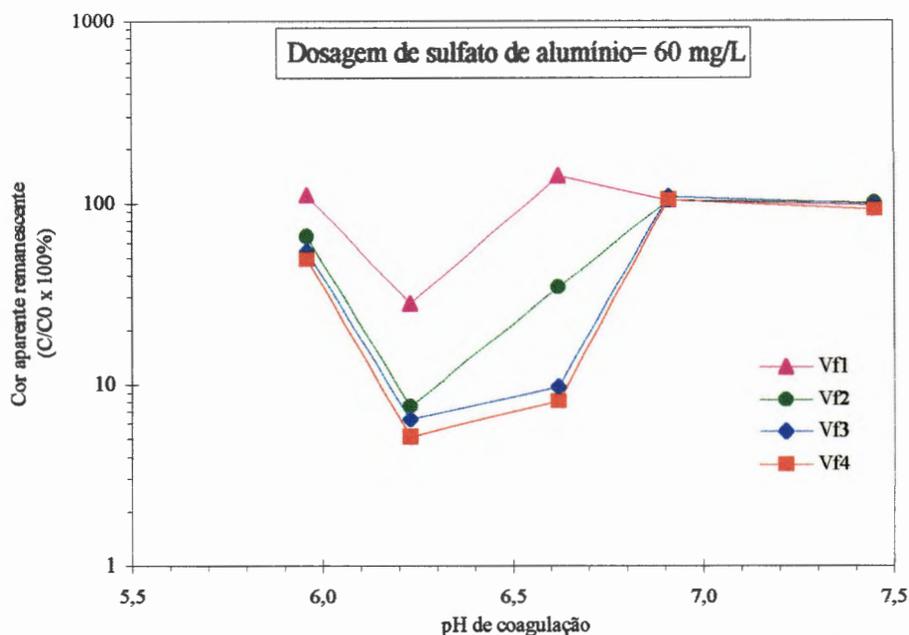


FIGURA 38 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 60 mg/L.

Ensaios realizados com o equipamento de flotateste e água tipo I. Velocidade de flotação: VF1= 31,6 cm/min, VF2= 13,3 cm/min, VF3= 6,7 cm/min, VF4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6$  °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

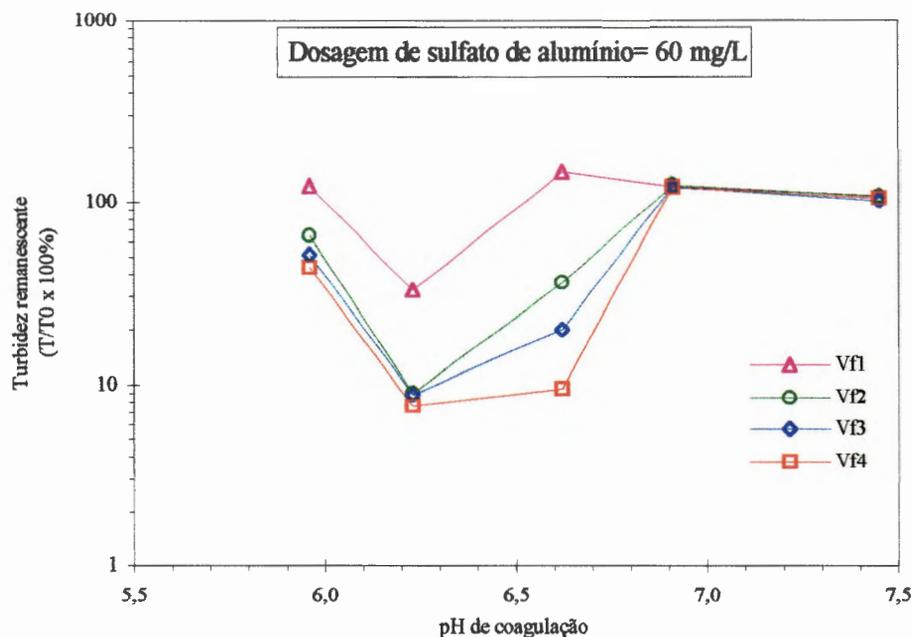


FIGURA 39 - Turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 60 mg/L.

Ensaios realizados com o equipamento de flotateste e água tipo I. Velocidade de flotação: VF1= 31,6 cm/min, VF2= 13,3 cm/min, VF3= 6,7 cm/min, VF4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6$  °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

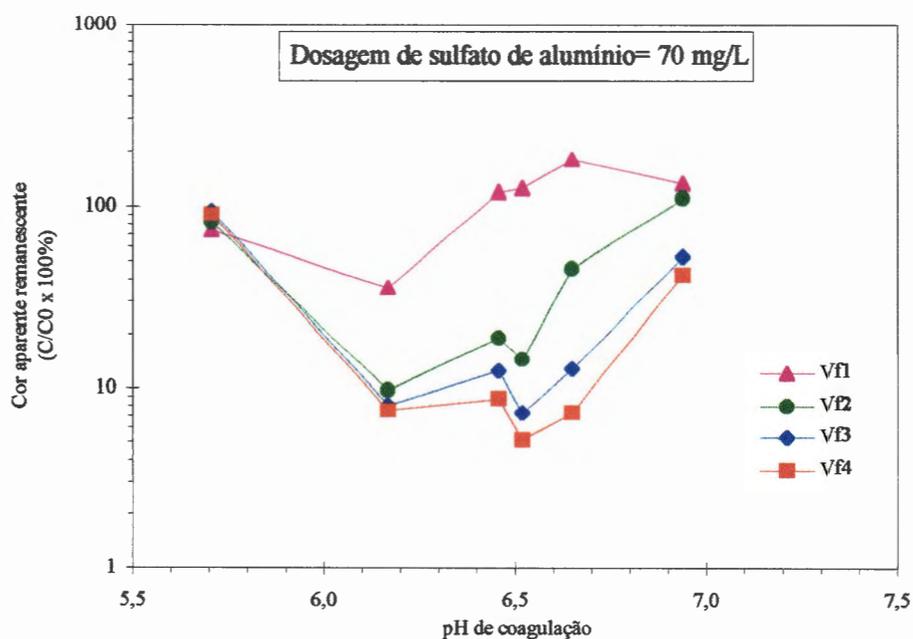


FIGURA 40 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 70 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6$  °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

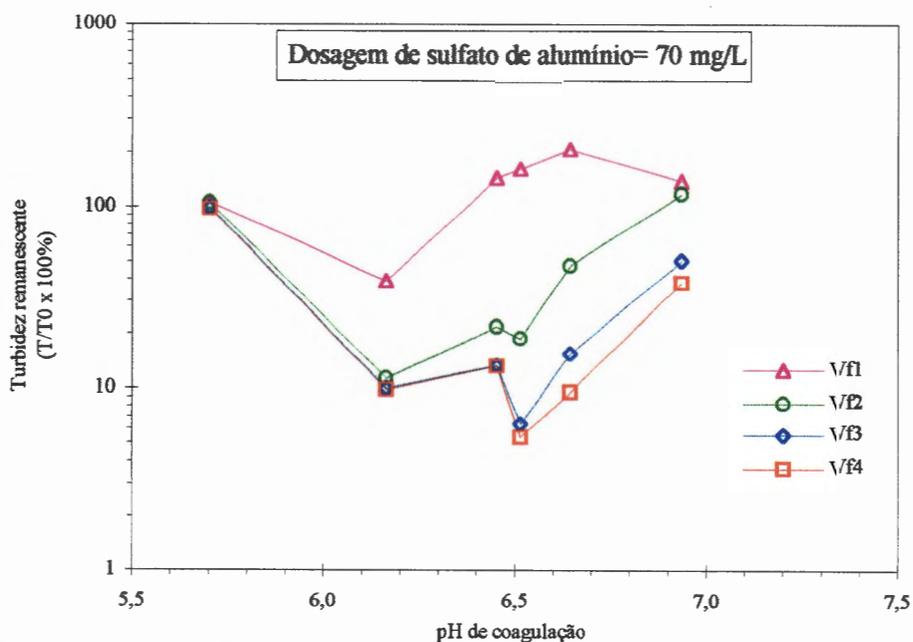


FIGURA 41 - Turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 70 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6$  °C (Fonte: tabela 1, apêndice 1).

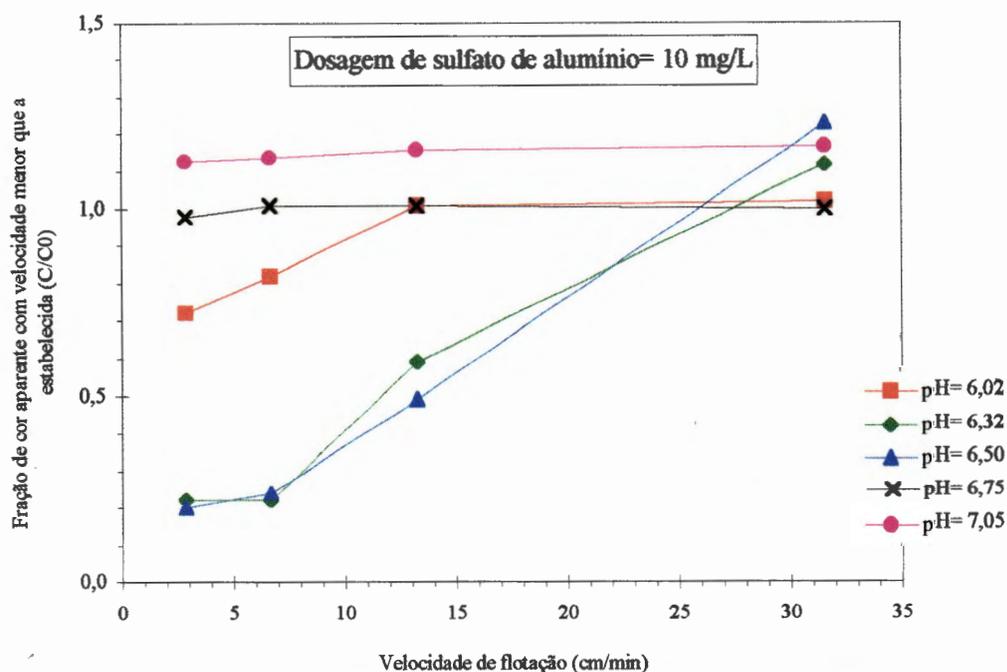


FIGURA 42 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 10 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação. Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6$  °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

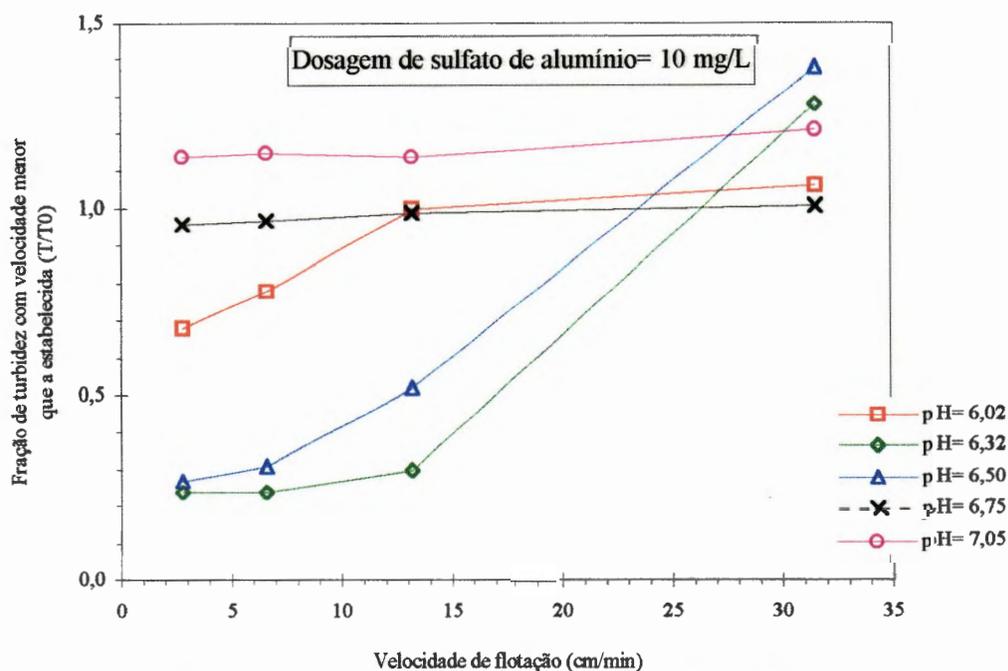


FIGURA 43 - Turbidez remanescente ( $T/T_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 10 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação. Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $25,6 \pm 1,6$  °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).



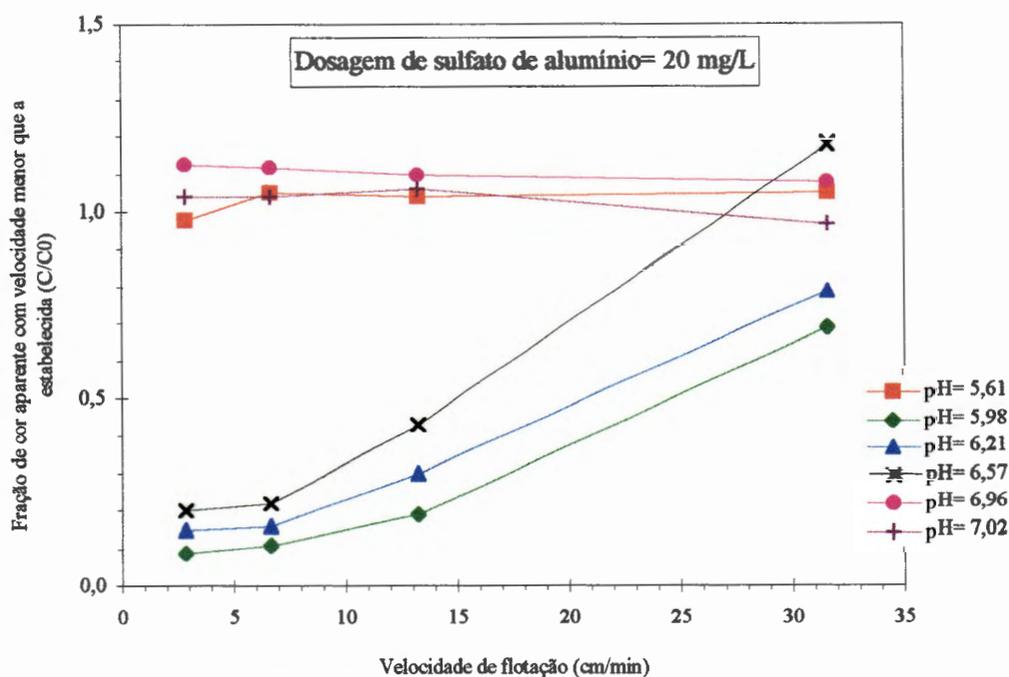


FIGURA 44 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 20 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação. Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

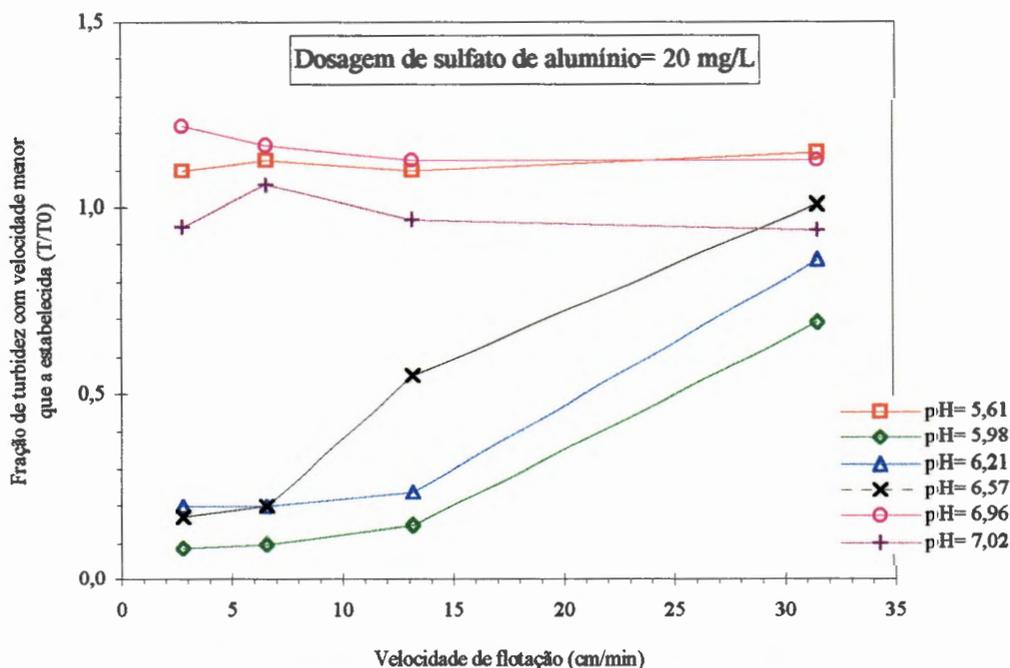


FIGURA 45 - Turbidez remanescente ( $T/T_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 20 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação. Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

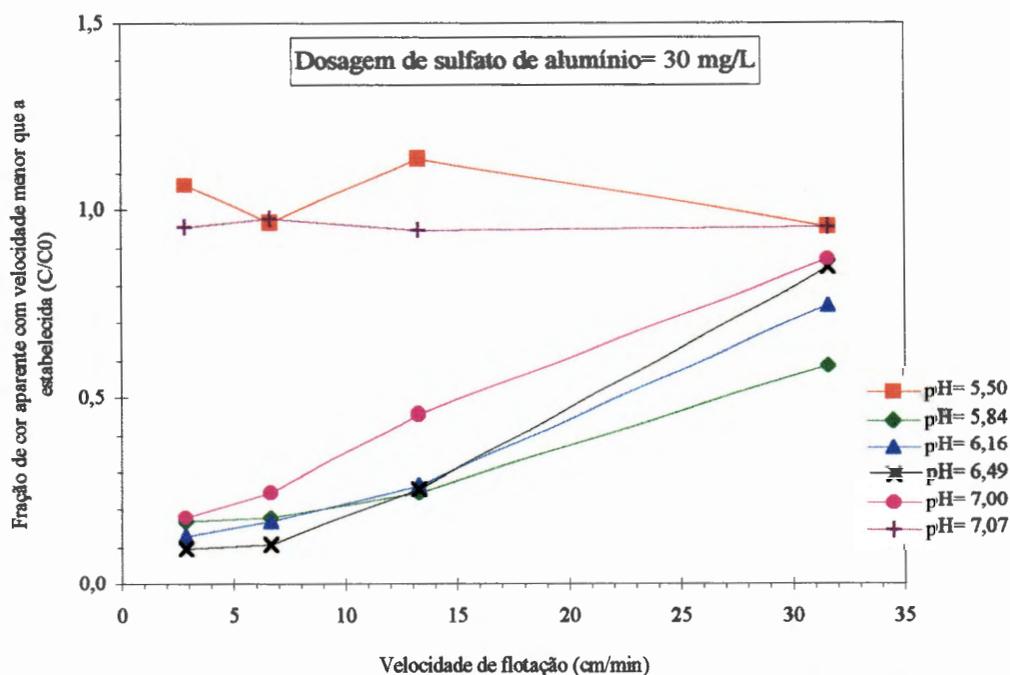


FIGURA 46 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 30 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação. Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

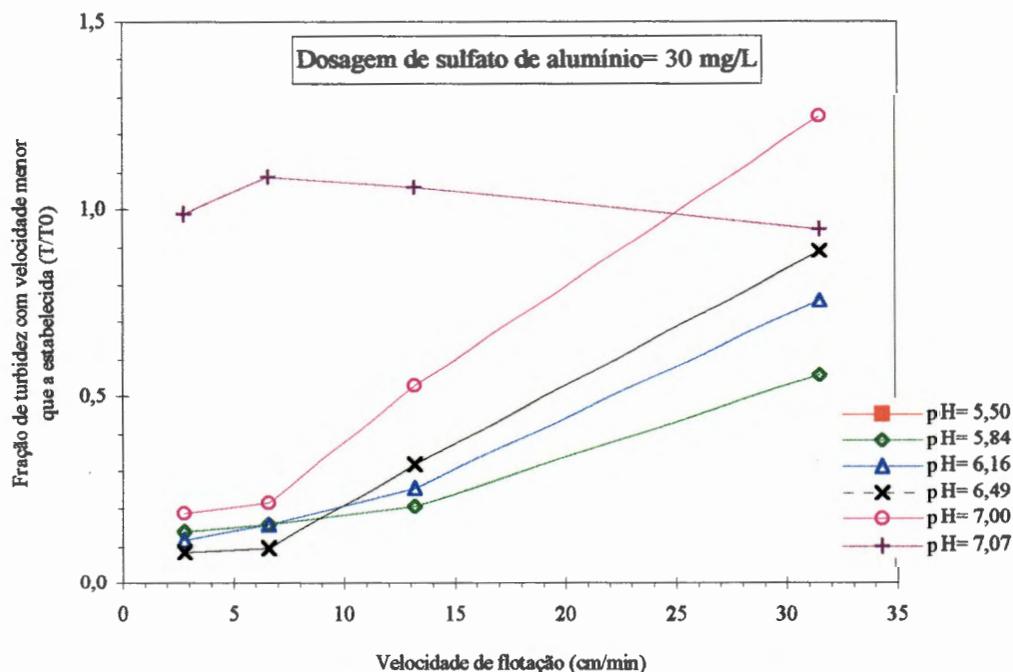


FIGURA 47 - Turbidez remanescente ( $T/T_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 30 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação. Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

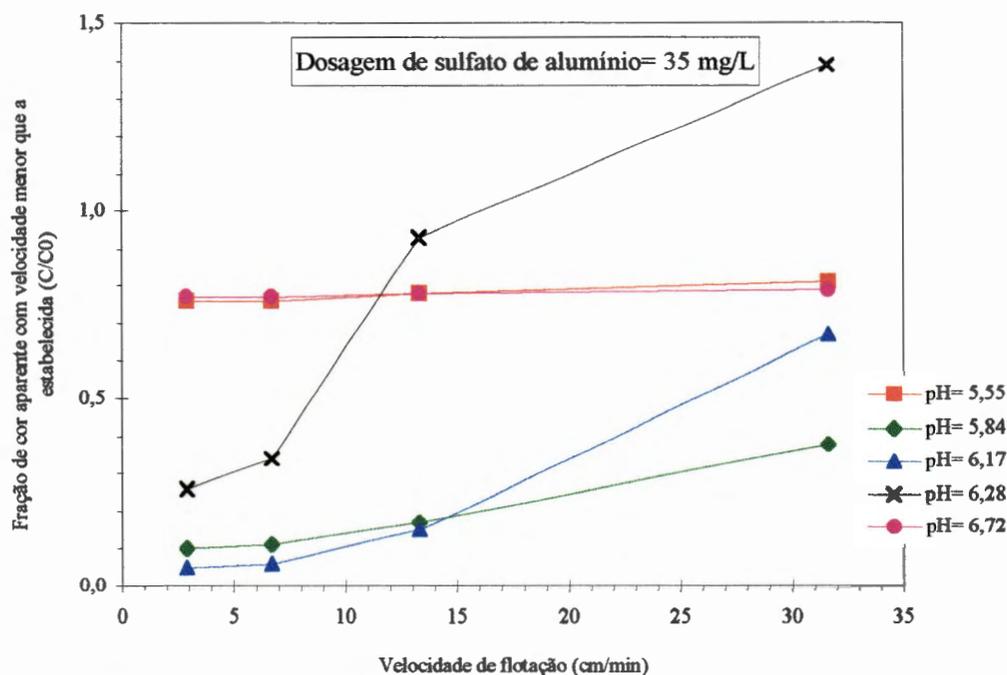


FIGURA 48 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 35 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação. Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

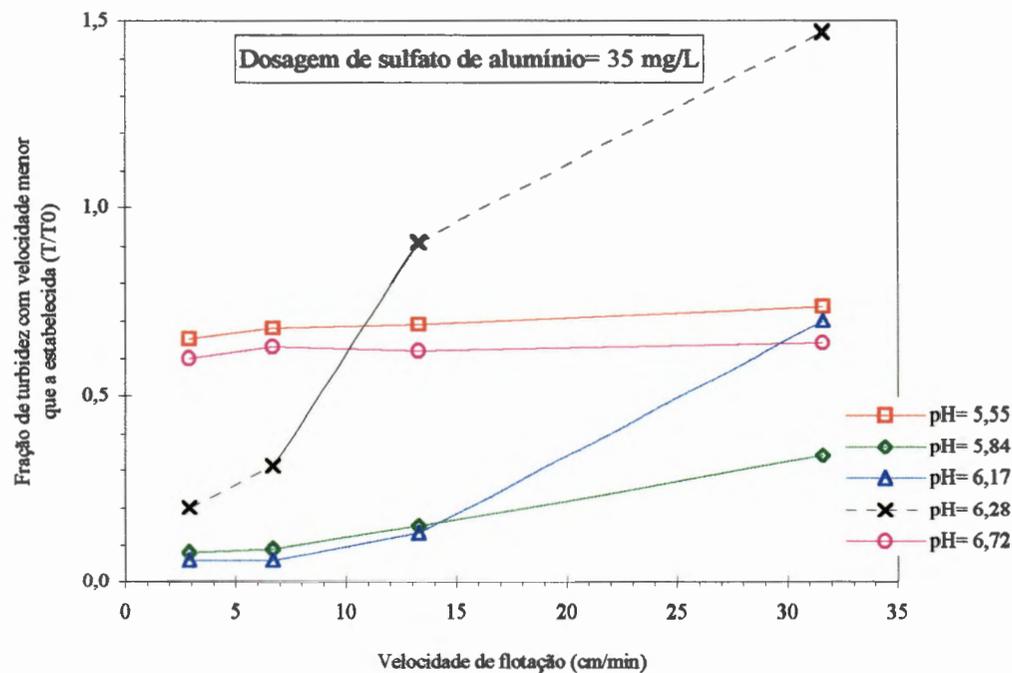


FIGURA 49 - Turbidez remanescente ( $T/T_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 35 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação. Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

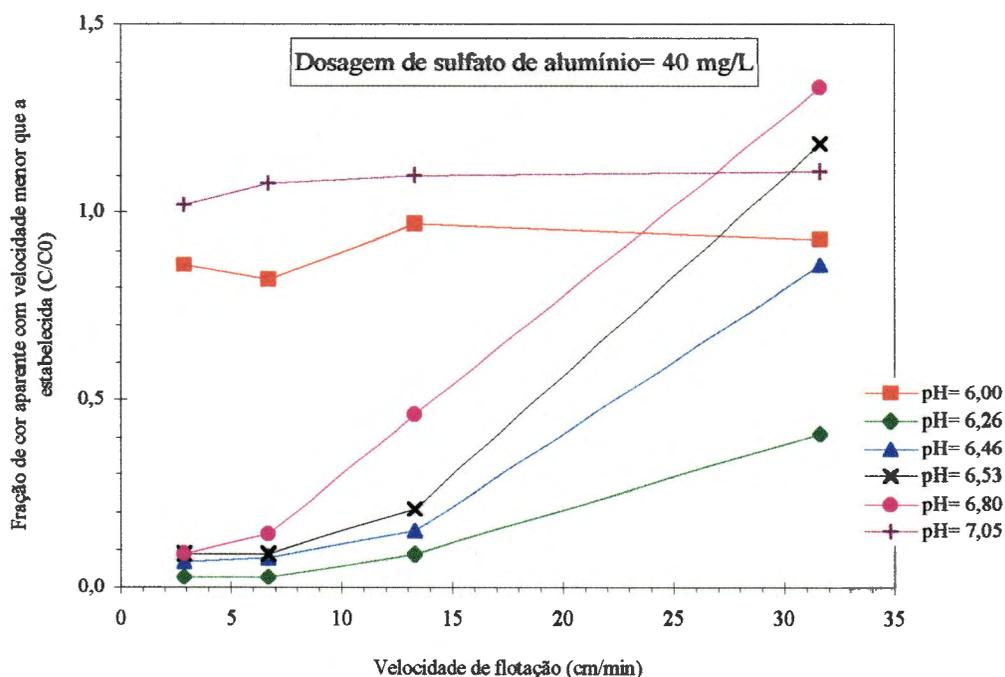


FIGURA 50 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 40 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação. Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

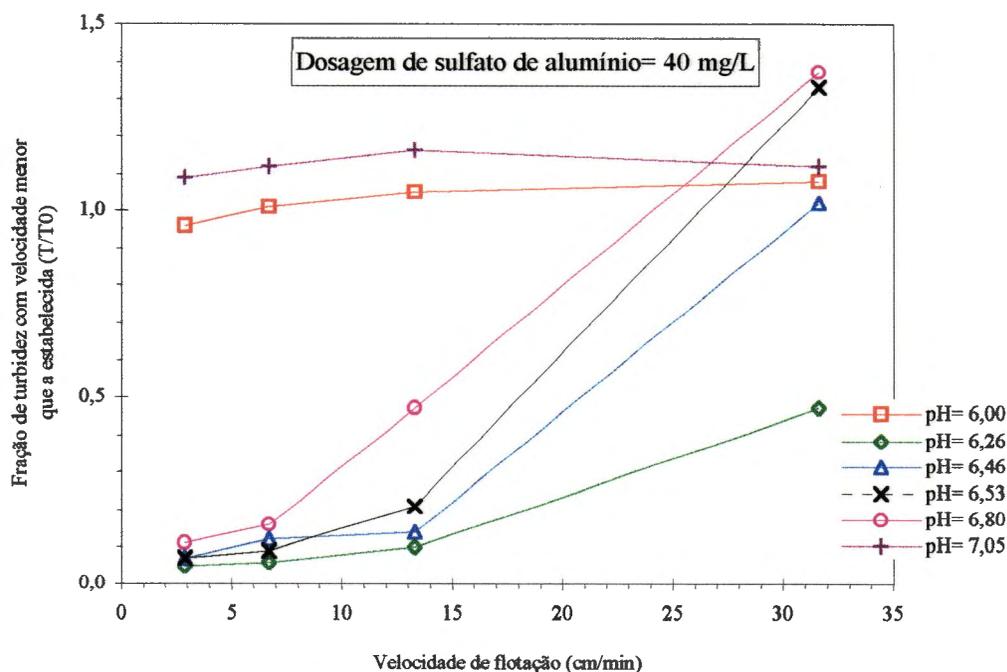


FIGURA 51 - Turbidez remanescente ( $T/T_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 40 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação. Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

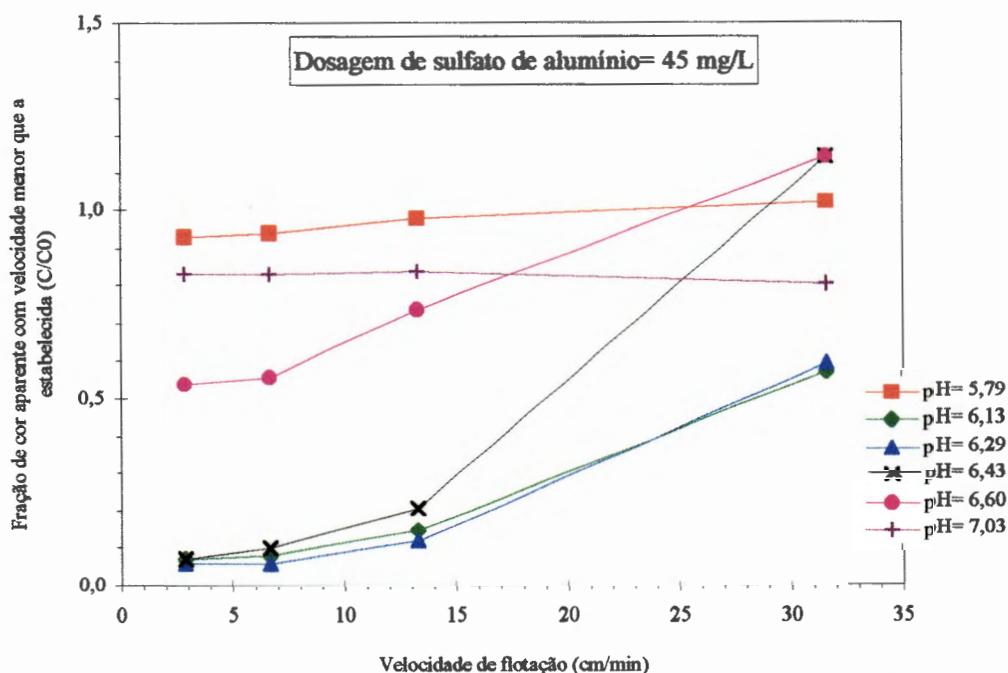


FIGURA 52 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 45 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação. Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

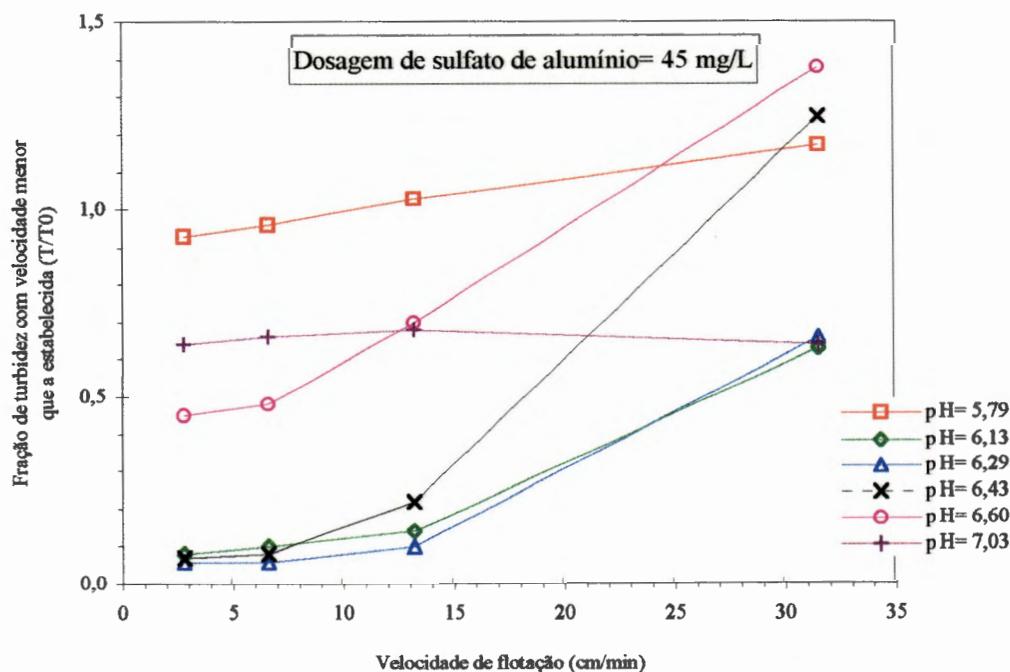


FIGURA 53 - Turbidez remanescente ( $T/T_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 45 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação. Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

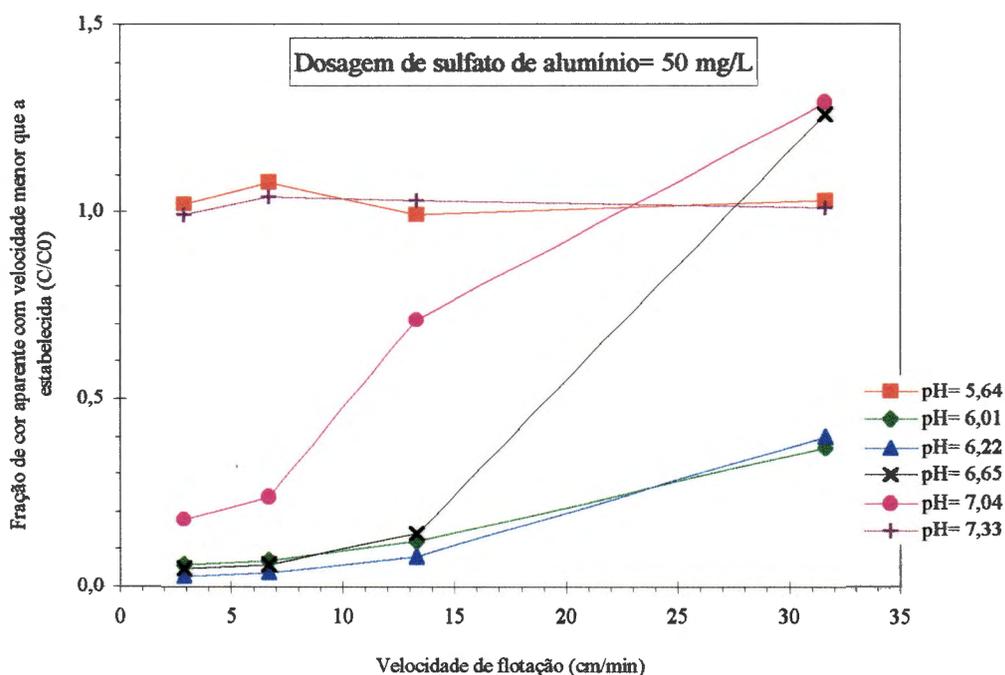


FIGURA 54 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 50 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

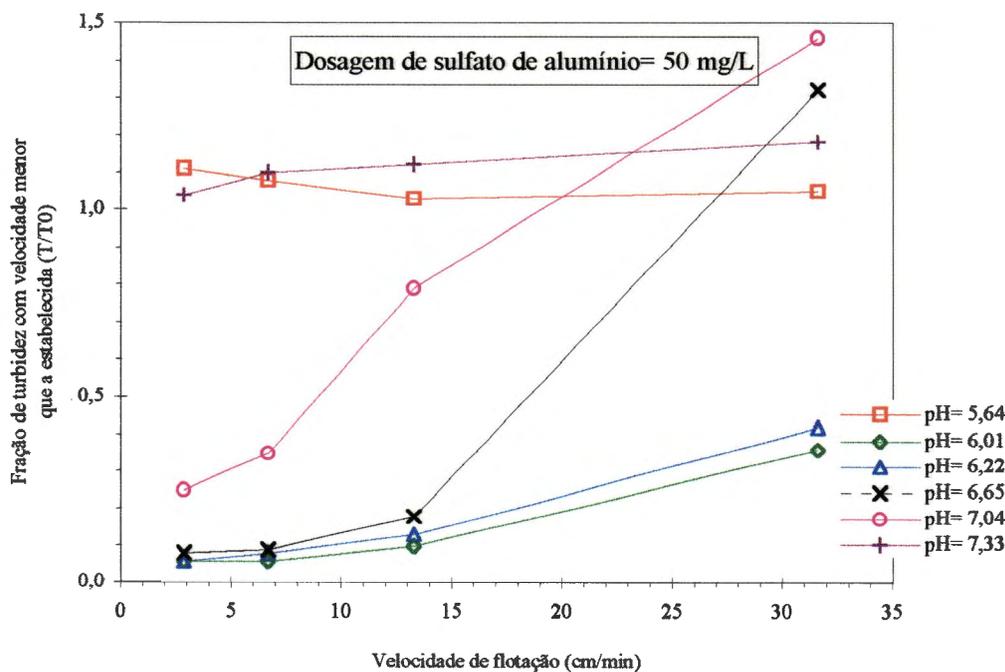


FIGURA 55 - Turbidez remanescente ( $T/T_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 50 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

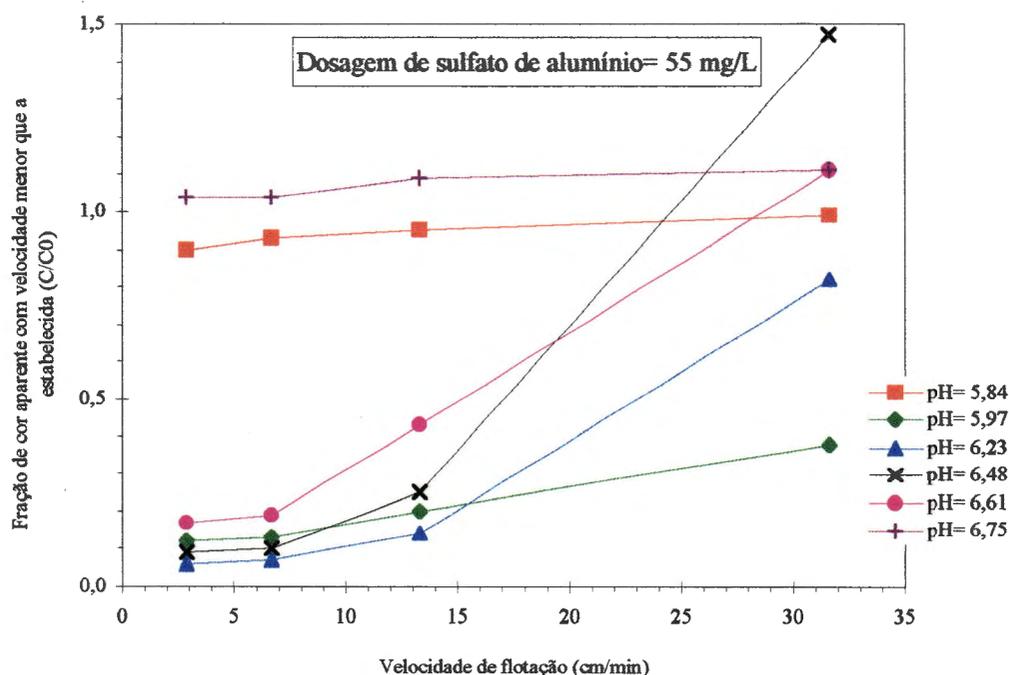


FIGURA 56 - Cor aparente remanescente (C/C0) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 55 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

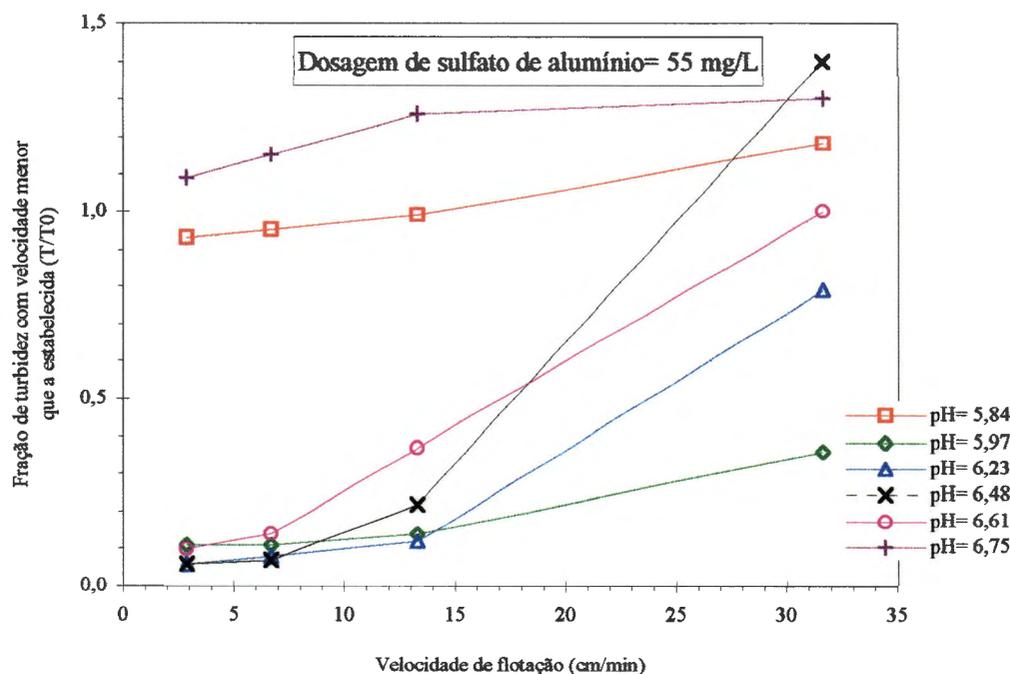


FIGURA 57 - Turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 55 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

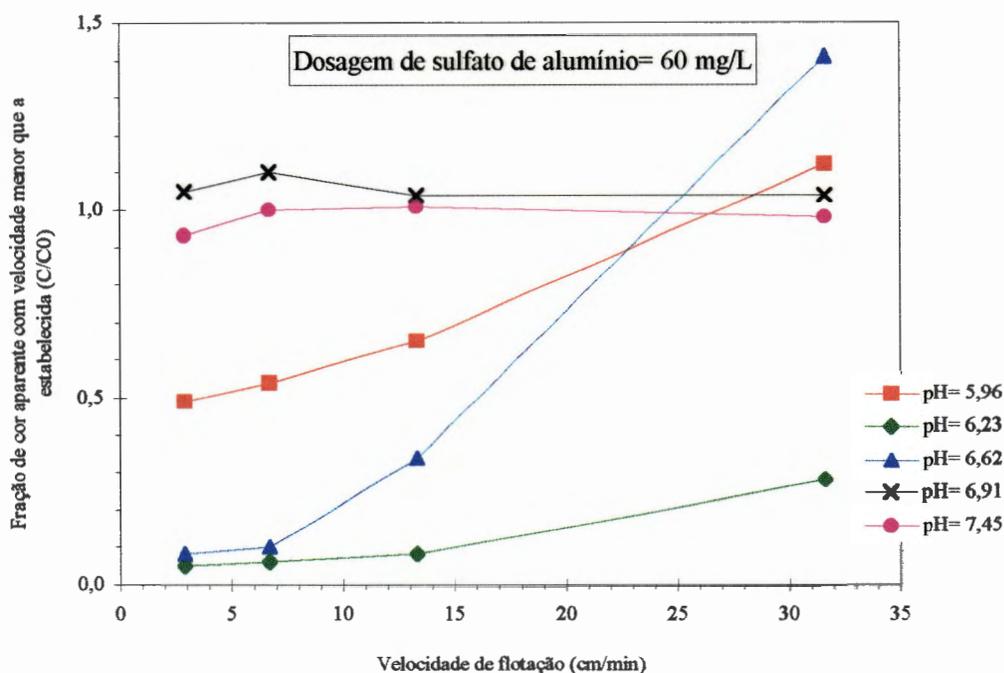


FIGURA 58 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 60 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

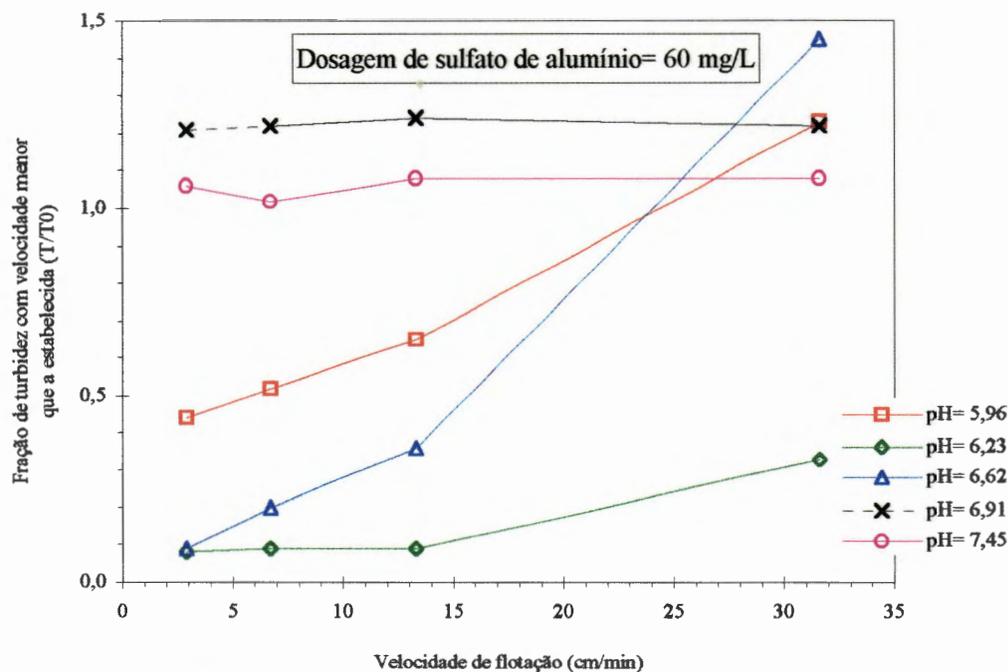


FIGURA 59 - Turbidez remanescente ( $T/T_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 60 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

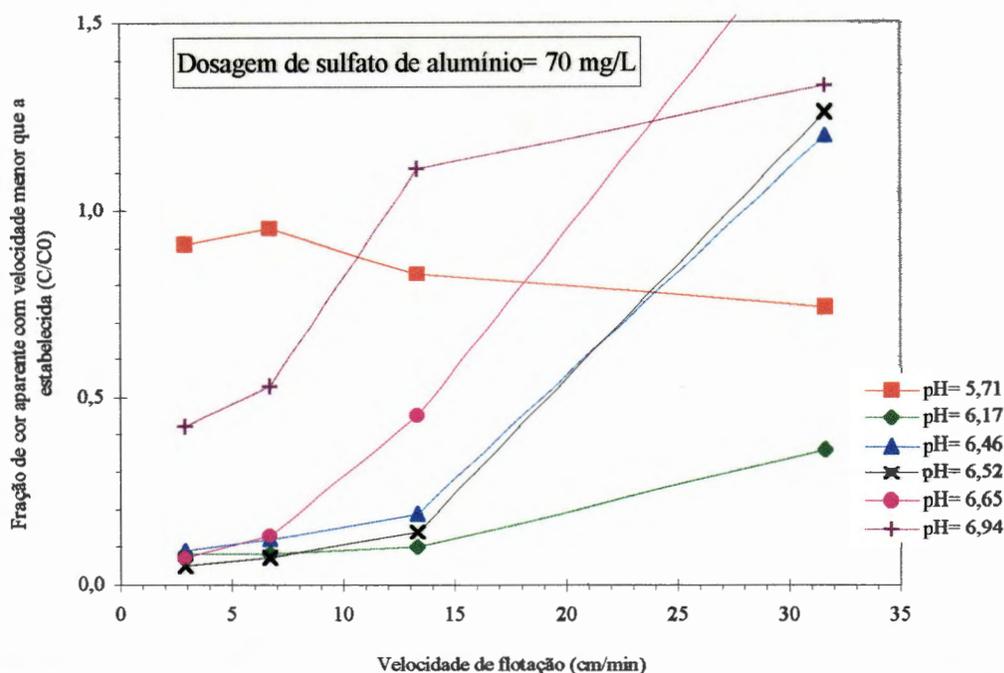


FIGURA 60 - Cor aparente remanescente (C/C0) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 70 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

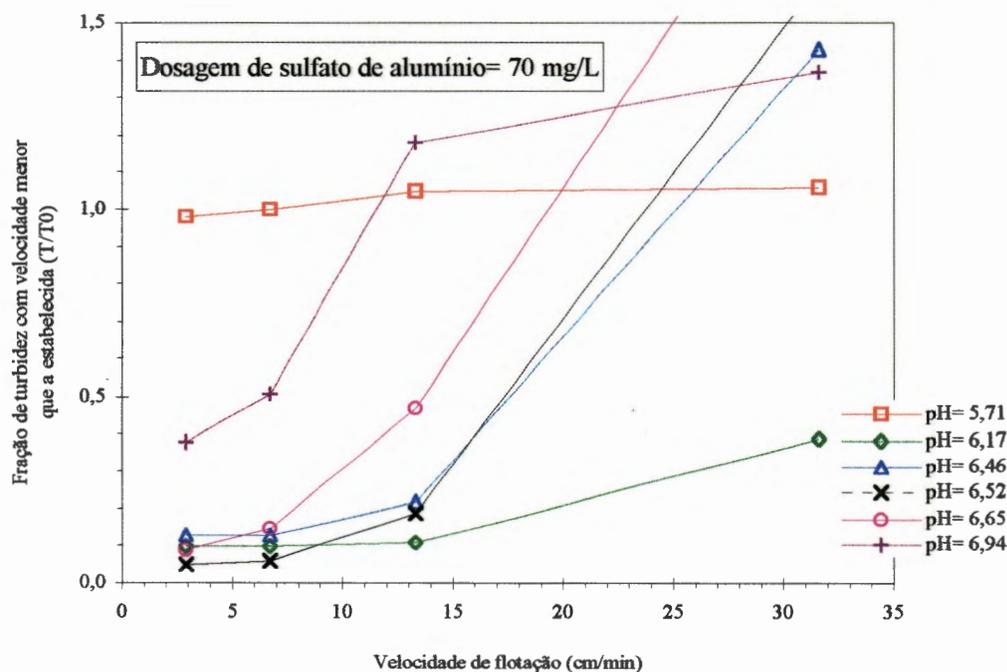


FIGURA 61 - Turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 70 mg/L e diferentes valores de pH de coagulação.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,6 + 1,6 °C (Fonte: tabela 2, apêndice 1).

### 5.2.2 Otimização da quantidade de ar fornecida, em ensaios realizados com o equipamento de flotateste e água tipo I

A variação da quantidade de ar fornecida para a flotação foi obtida variando-se a fração de recirculação (R), mantendo-se fixa a pressão na câmara de saturação (441 kPa). Foram testadas frações de recirculação de 2, 4, 6, 8, 10 e 12% em relação ao volume da água coagulada e floculada. Nos ensaios foram adotados os valores ótimos de dosagem de sulfato de alumínio (DSA= 40 mg/L) e do pH de coagulação (próximo a 6,3) encontrados na etapa de ensaios descritos no item 5.2.1. Os outros parâmetros operacionais, quais sejam, Tmr, Gmr, Tf e Gf, foram mantidos constantes, com valores iguais aos mencionados no item 5.2.1.

Os resultados obtidos nesta etapa da pesquisa são apresentados nas figuras 62 a 67, nas quais são mostradas a fração remanescente de cor aparente e turbidez em função da velocidade de flotação. Para facilitar a visualização do efeito da fração de recirculação, na figura 68 são apresentados os resultados de remoção de cor aparente obtidos para os diversos valores de frações de recirculação estudados. A análise destes resultados é feita conforme mencionado no item 5.2.1 para curvas de flotação.

Para todos os valores testados de fração de recirculação, obteve-se eficiência de remoção de cor aparente e turbidez maior que 85% para Vf até 6,7 cm/min ( $\cong$  96 m/d). Para Vf até 13,3 cm/min ( $\cong$  191 m/d), foi obtida eficiência de remoção de cor aparente e turbidez maior que 88% para fração de recirculação de 8, 10 e 12%, sendo que para 8 e 10% a remoção foi maior ou igual a 90%.

Um resumo dos resultados apresentados nas figuras 62 a 67 é mostrado no quadro 6, a seguir.

Observando-se o quadro 6, nota-se que, a partir de um determinado valor de fração de recirculação (10%), o aumento da fração de recirculação não implica em melhor desempenho da flotação, já que, para fração de recirculação de 12%, a eficiência de remoção de cor aparente e turbidez foi menor para todas as velocidades de flotação utilizadas. Da mesma forma, o bom desempenho da flotação requer uma quantidade de ar mínima, sendo que até 4% de recirculação, observa-se menor

eficiência de remoção de cor aparente e turbidez comparando-se com as remoções obtidas para fração de recirculação de 6, 8 e 10%, para  $V_f$  até 13,3 cm/min.

QUADRO 6 - Resumo dos resultados obtidos durante a otimização da quantidade de ar fornecida à flotação, a partir da variação da fração de recirculação em ensaios realizados com o equipamento de flotatete e água tipo I

Fração de recirculação (% em volume)	Eficiência de remoção de cor aparente (%)*					Eficiência de remoção de turbidez (%)*				
	Velocidade de flotação (cm/min)					Velocidade de flotação (cm/min)				
	2,9	4,0	6,7	13,3	31,6	2,9	4,0	6,7	13,3	31,6
2	86,6	86,4	85,7	83,0	56,6	87,0	86,9	86,5	84,3	55,4
4	91,1	91,1	90,5	86,4	64,1	91,8	91,7	91,4	88,1	64,4
6	94,5	94,2	93,0	88,9	61,2	98,0	97,3	95,0	90,5	61,9
8	93,2	93,1	92,5	90,0	75,7	93,9	93,8	93,3	91,0	77,2
10	93,8	93,7	93,1	90,4	66,3	94,1	94,0	93,8	91,7	66,1
12	90,4	90,4	90,3	88,3	56,5	91,0	91,0	91,0	88,4	54,6

\*Foi levada em conta a remoção da fração de flocos flutando com velocidade menor que a considerada.

Para frações de recirculação de 6, 8 e 10%, observa-se valores bastante similares de eficiência de remoção de cor aparente entre as mesmas, para cada velocidade de flotação, considerando  $V_f$  até 13,3 cm/min, tais como, eficiência de remoção de 93,2 a 94,5% para  $V_f = 2,9$  cm/min; 93,1 a 94,2% para  $V_f = 4,0$  cm/min; 92,5 a 93,1% para  $V_f = 6,7$  cm/min e 88,9 a 90,4% para  $V_f = 13,3$  cm/min. Por outro lado, para  $V_f = 31,6$  cm/min, a remoção de cor aparente (75,7%) obtida para fração de recirculação de 8%, foi relativamente maior que a remoções apresentadas para as frações de recirculação de 6 e 10% (remoção de 61,2 e 66,3%, respectivamente). Fato semelhante também ocorreu com relação à remoção de turbidez para  $V_f = 31,6$  cm/min e fração de recirculação de 8%, ou seja, obteve-se remoção de turbidez de

77,2% para fração de recirculação de 8%, remoção de 61,9% para fração de recirculação de 6% e remoção de 66,1% para fração de recirculação de 10%.

Então, com base nos resultados mostrados nas figuras 62 a 68 e quadro 6, a fração de recirculação de 8% (em volume), para pressão na câmara de saturação de 441 kPa, foi assumida como ótima, sendo utilizada nos ensaios subsequentes com reator estático de floculação-flotação (flotatestes). Considerando-se que a água presente na câmara pressurizada do flotatestes estivesse com nível máximo de saturação para a temperatura de ensaio ( $24,9 \pm 0,4$  °C), a fração de recirculação de 8% proporcionou uma concentração de ar para a flotação de, aproximadamente, 7,8 g de ar/m<sup>3</sup> de água bruta. Tal concentração de ar (7,8 g de ar/m<sup>3</sup> de água) foi determinado de acordo com WEAST (1989) para temperatura de 25°C e pressão de 441 kPa.

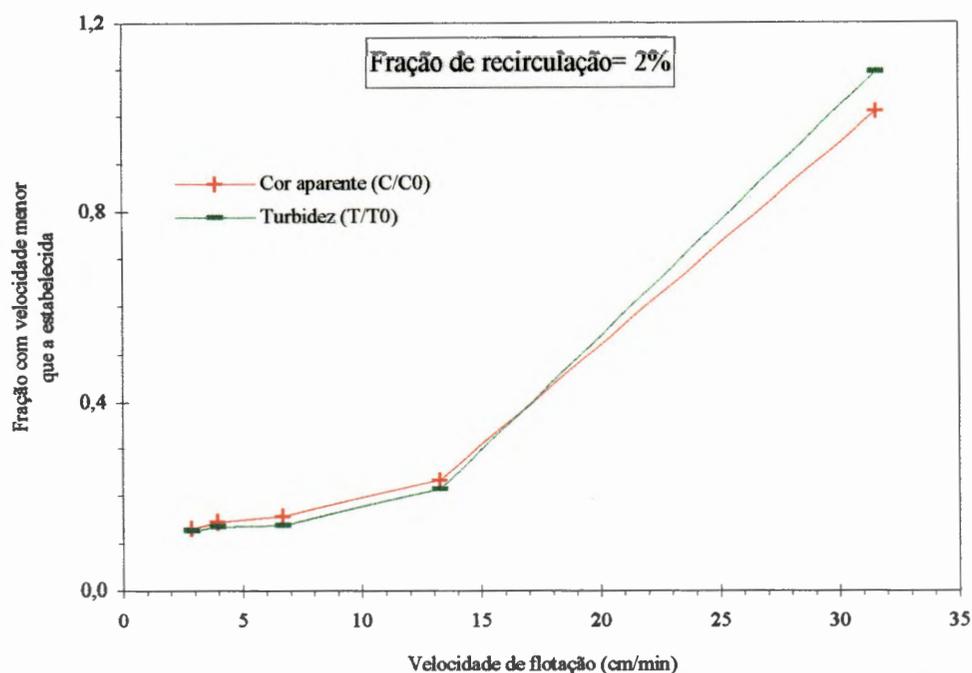


FIGURA 62 - Cor aparente remanescente (C/C0) e turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação para fração de recirculação= 2% (em volume).

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida: 6,32; pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 24,9 °C (Fonte: tabela 3, apêndice 1).

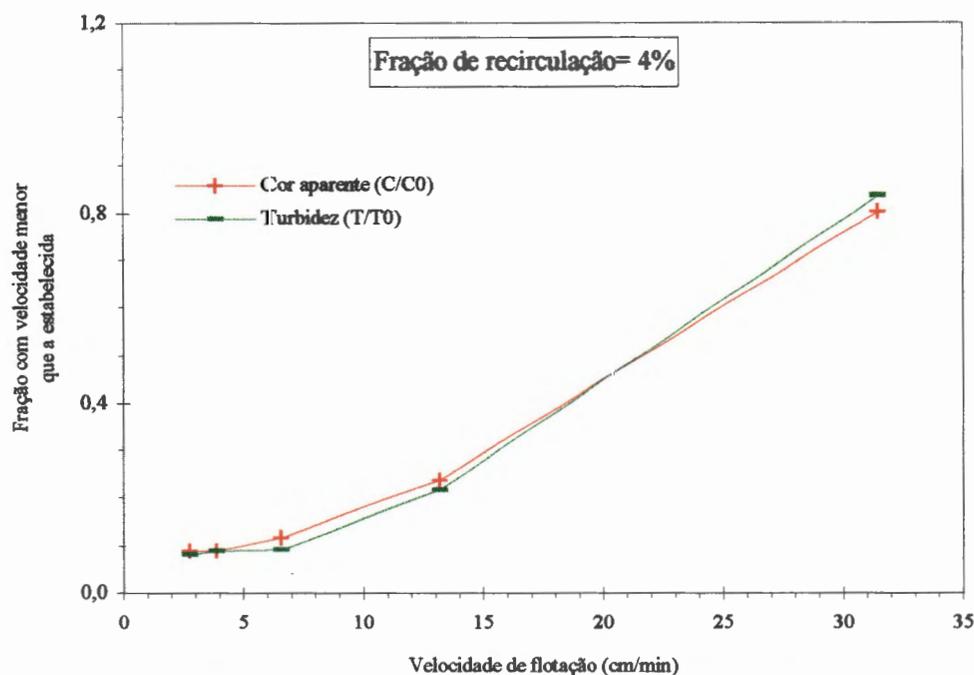


FIGURA 63 - Cor aparente remanescente (C/C0) e turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação para fração de recirculação= 4% (em volume).

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida: 6,26; pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 24,7 °C (Fonte: tabela 3, apêndice 1).

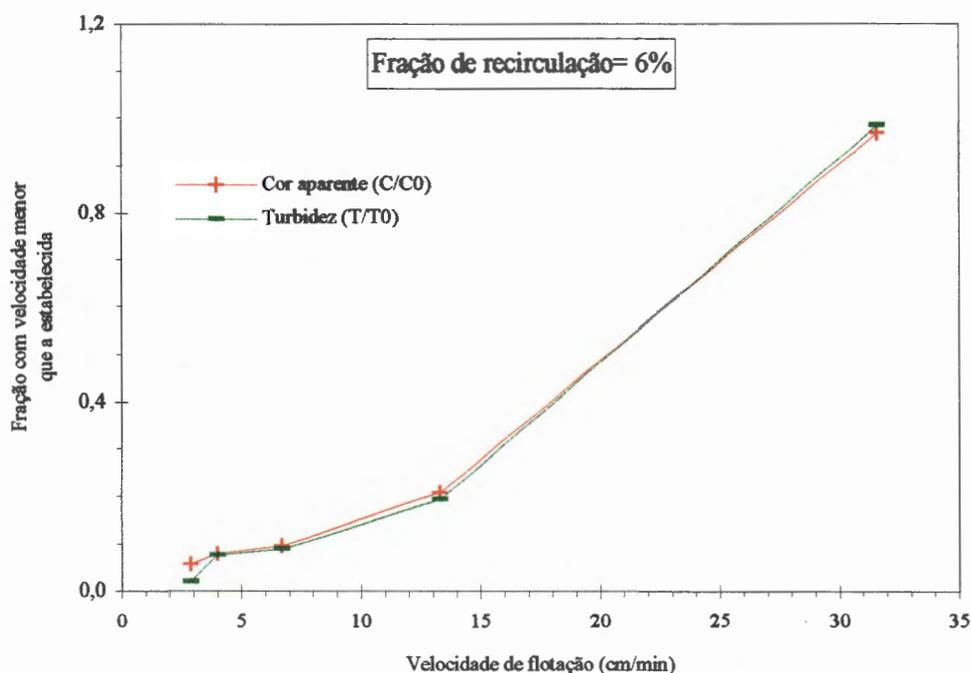


FIGURA 64 - Cor aparente remanescente (C/C0) e turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação para fração de recirculação= 6% (em volume).

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida: 6,29; pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 24,5 °C (Fonte: tabela 3, apêndice 1).

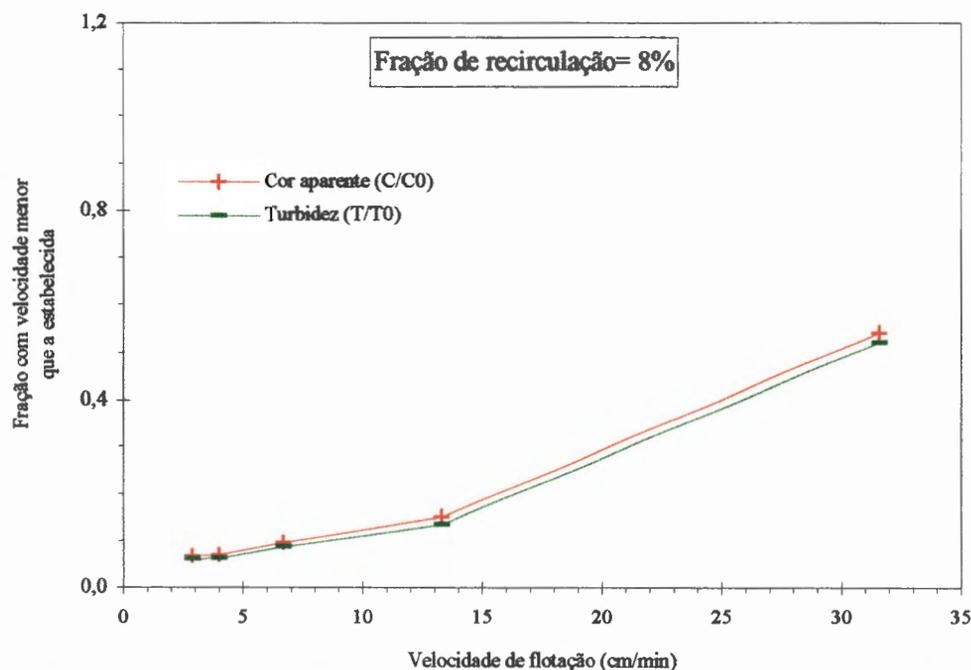


FIGURA 65 - Cor aparente remanescente (C/C0) e turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação para fração de recirculação= 8% (em volume).

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida: 6,39; pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,2 °C (Fonte: tabela 3, apêndice 1).

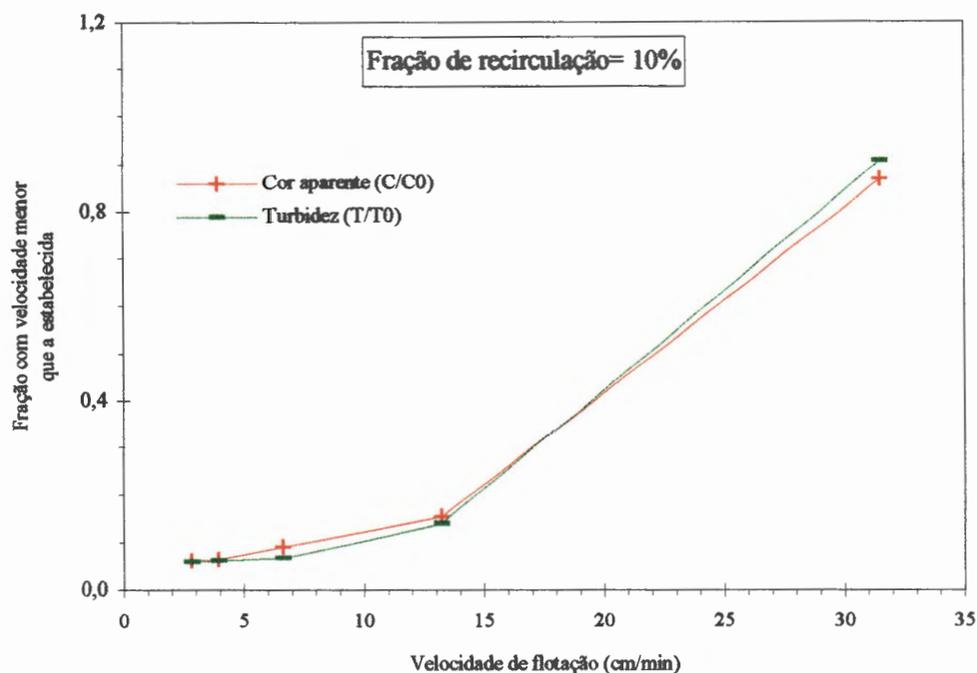


FIGURA 66 - Cor aparente remanescente (C/C0) e turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação para fração de recirculação= 10% (em volume).

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida: 6,29; pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,2 °C (Fonte: tabela 3, apêndice 1).

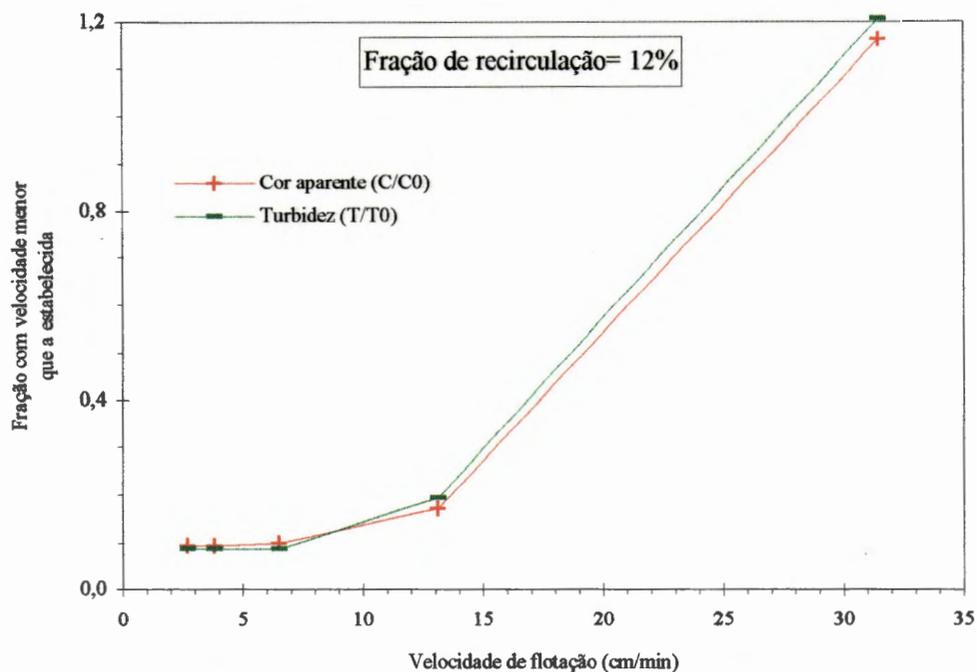


FIGURA 67 - Cor aparente remanescente (C/C0) e turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação para fração de recirculação= 12% (em volume).

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida: 6,32; pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura: 25,3 °C (Fonte: tabela 3, apêndice 1).

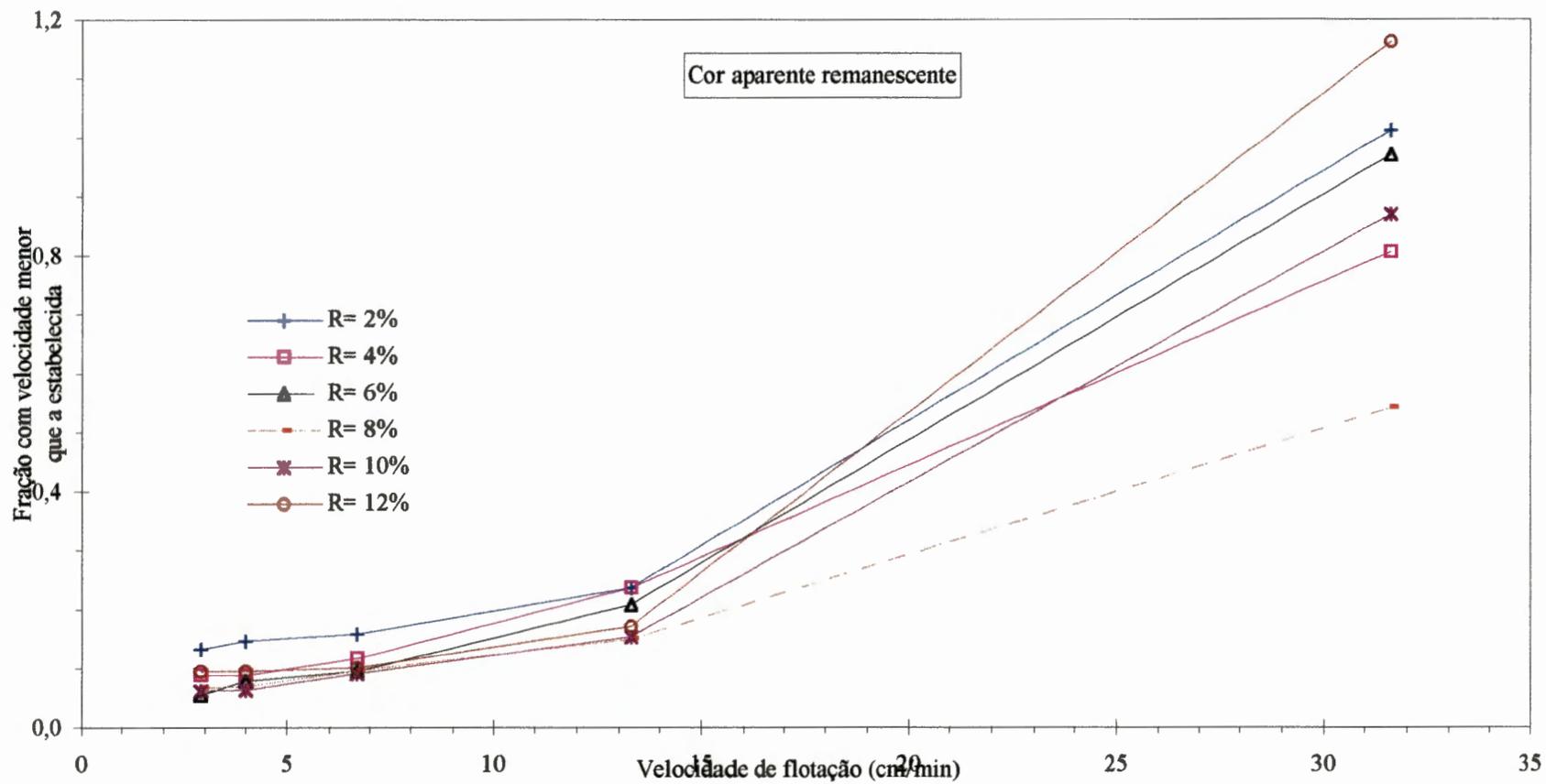


FIGURA 68 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0$ ) em função da velocidade de flotação para fração de recirculação (R) de 2%, 4%, 6%, 8%, 10% e 12% (em volume).

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida:  $6,33 \pm 0,07$ ; pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $24,9 \pm 0,4$  °C (Fonte: tabela 3, apêndice 1).

### 5.2.3 Otimização do tempo e do gradiente de velocidade médio de mistura rápida, utilizando-se o equipamento de flotateste e água tipo I

Nas figuras 69 a 74, a seguir, são apresentados os resultados de cor aparente e de turbidez remanescentes obtidos em função da variação do tempo da mistura rápida para valores de gradiente de velocidade médio de mistura rápida ( $G_{mr}$ ) de 600, 700, 800, 900, 1000 e 1100  $s^{-1}$ .

As amostras foram coletadas para dois valores de  $V_f$ : 21,8 cm/min ( $\cong$  314 m/d) e 13,3 cm/min ( $\cong$  191 m/d). Esses valores de  $V_f$  foram definidos em função dos resultados obtidos durante a otimização da dosagem de coagulante e pH de coagulação (item 5.2.1), nos quais pôde-se perceber que para  $V_f$  até 6,7 cm/min ( $\cong$  96 m/d), a eficiência de remoção por flotação foi, praticamente, a mesma que para  $V_f$  de 2,9 cm/min ( $\cong$  96 m/d). Assim, acredita-se que uma velocidade de flotação relativamente alta possa representar melhor a influência dos parâmetros que estão sendo estudados em cada caso. As outras condições de ensaios foram mantidas constantes e iguais às mencionadas nos itens 5.2.1 e 5.2.2, ou seja, coagulação: DSA= 40 mg/L e  $pH_{coag}$  em torno de 6,3; floculação:  $T_f$ = 15 min e  $G_f$ = 31  $s^{-1}$ ; fração de recirculação:  $R$ = 8% (em volume) e pressão de saturação:  $P$ = 441 kPa.

Nos resultados apresentados nas figuras 69 a 74, verifica-se uma tendência de diminuição do tempo de mistura rápida com o aumento do gradiente de velocidade médio de mistura rápida, considerando a melhor eficiência de remoção em cada figura.

De maneira geral, considerando  $V_f$ = 13,3 cm/min, obteve-se eficiência de remoção de cor aparente e turbidez maior que 84% para todos os valores testados de  $G_{mr}$  e  $T_{mr}$ . Contudo, para cada par de  $T_{mr}$  e  $G_{mr}$  que apresentou melhor eficiência de remoção, em cada figura, constata-se remoção de cor aparente e turbidez maior que 87% para  $V_f$ = 13,3 cm/min, admitindo-se os pares apresentados no quadro 7 como representantes da melhor eficiência de remoção em cada caso, considerando as variações estudadas de tempo e gradiente de velocidade médio de mistura rápida.

QUADRO 7 - Valores ótimos de gradiente de velocidade médio e tempo de mistura rápida com respectivos valores de eficiência de remoção de cor aparente e turbidez para  $V_f = 21,8$  cm/min e  $V_f = 13,3$  cm/min. Ensaios realizados com o equipamento de flotateste e água tipo I

Gmr ( $s^{-1}$ )	Tmr (s)	Eficiência de remoção de cor aparente (%)		Eficiência de remoção de turbidez (%)	
		Vel. de flotação (cm/min)		Vel. de flotação (cm/min)	
		13,3	21,8	13,3	21,8
600	30	88,3	81,7	90,9	83,1
700	20	89,3	71,2	87,9	74,1
800	10	91,5	79,2	92,4	79,1
900	10	93,4	64,1	89,4	49,3
1000	10	94,1	90,2	93,7	85,5
1100	10	93,9	88,5	92,9	89,7

A partir do quadro 7, verifica-se que para  $V_f = 21,8$  cm/min, foi obtida remoção acima de 80% de cor aparente e de turbidez para valores de Gmr de 600, 1000 e 1100  $s^{-1}$ . No entanto, para  $V_f = 21,8$  cm/min, a maior eficiência de remoção de cor aparente (90,2%) foi observada para Gmr = 1000  $s^{-1}$  com Tmr = 10 s, com remoção de turbidez de 85,5%, sendo tais resultados relativamente próximos aos resultados obtidos com Gmr = 1100  $s^{-1}$  com Tmr = 10 s.

Assim, com base nos resultados apresentados nas figuras 69 a 74 e quadro 7, adotou-se Gmr = 1000  $s^{-1}$  e Tmr = 10 s para serem utilizados nos ensaios subsequentes.

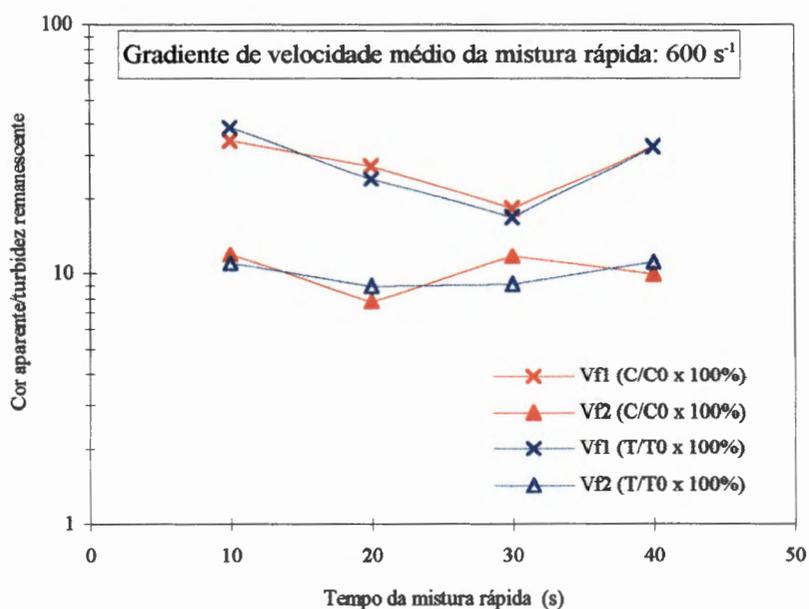


FIGURA 69 - Cor aparente remanescente (C/C0 x 100%) e turbidez remanescente (T/T0 x 100%) em função do tempo de mistura rápida para um gradiente de velocidade médio de mistura rápida= 600 s<sup>-1</sup>.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida: 6,33 ± 0,1; velocidade de flotação: Vf1= 21,8 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor apar.: 89 a 99 uC; turbidez: 6,5 a 7,8 uT; temp.: 25,0 ± 1,6 °C (Fonte: tabela 4, apêndice 1).

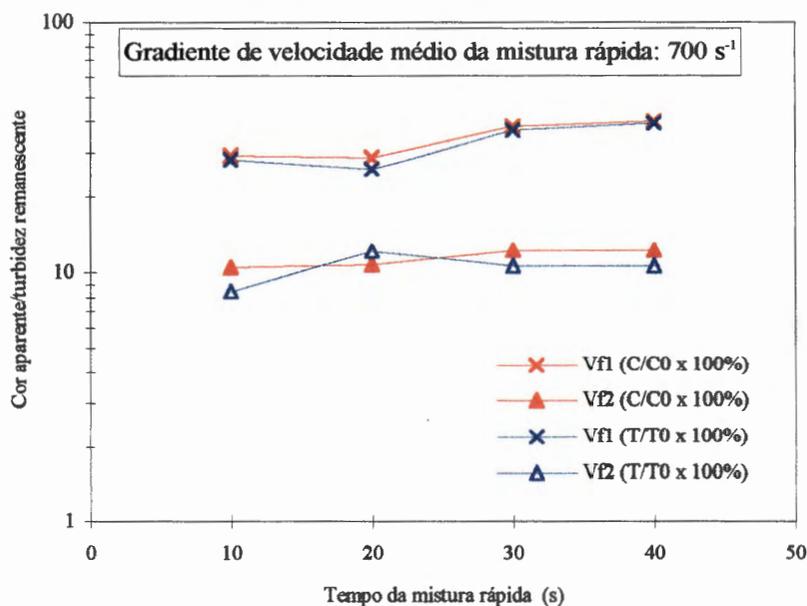


FIGURA 70 - Cor aparente remanescente (C/C0 x 100%) e turbidez remanescente (T/T0 x 100%) em função do tempo de mistura rápida para um gradiente de velocidade médio de mistura rápida= 700 s<sup>-1</sup>.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida: 6,33 ± 0,1; velocidade de flotação: Vf1= 21,8 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor apar.: 89 a 99 uC; turbidez: 6,5 a 7,8 uT; temp.: 25,0 ± 1,6 °C (Fonte: tabela 4, apêndice 1).

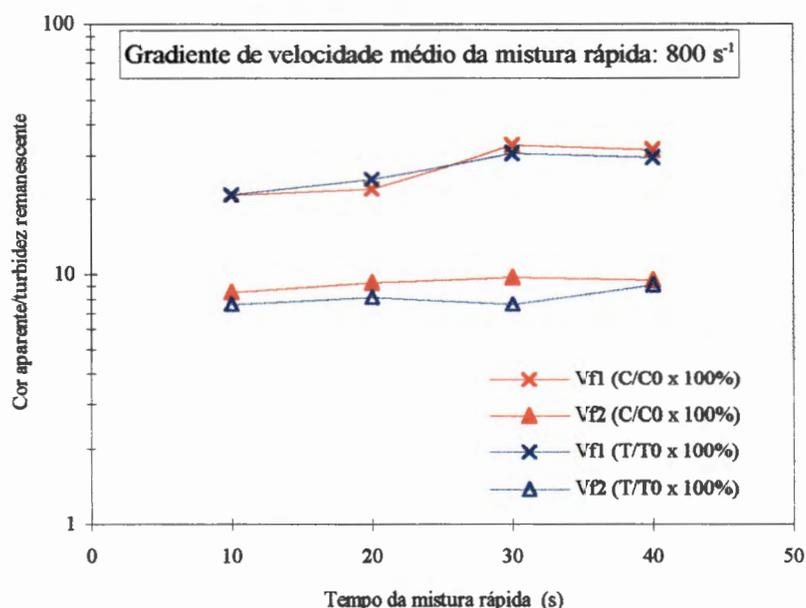


FIGURA 71 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do tempo de mistura rápida para um gradiente de velocidade médio de mistura rápida =  $800 \text{ s}^{-1}$ .

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio:  $40 \text{ mg/L}$ ; pH após mistura rápida:  $6,33 \pm 0,1$ ; velocidade de flotação:  $Vf1 = 21,8 \text{ cm/min}$ ,  $Vf2 = 13,3 \text{ cm/min}$ ; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação:  $441 \text{ kPa}$ . Características da água de estudo: cor apar.:  $89 \text{ a } 99 \text{ uC}$ ; turbidez:  $6,5 \text{ a } 7,8 \text{ uT}$ ; temp.:  $25,0 \pm 1,6 \text{ }^\circ\text{C}$  (Fonte: tabela 4, apêndice 1).

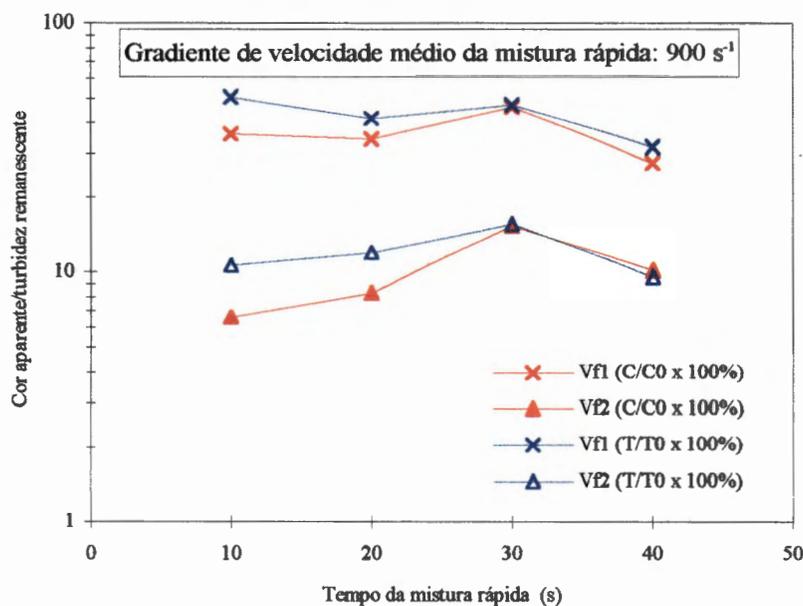


FIGURA 72 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do tempo de mistura rápida para um gradiente de velocidade médio de mistura rápida =  $900 \text{ s}^{-1}$ .

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio:  $40 \text{ mg/L}$ ; pH após mistura rápida:  $6,33 \pm 0,1$ ; velocidade de flotação:  $Vf1 = 21,8 \text{ cm/min}$ ,  $Vf2 = 13,3 \text{ cm/min}$ ; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação:  $441 \text{ kPa}$ . Características da água de estudo: cor apar.:  $89 \text{ a } 99 \text{ uC}$ ; turbidez:  $6,5 \text{ a } 7,8 \text{ uT}$ ; temp.:  $25,0 \pm 1,6 \text{ }^\circ\text{C}$  (Fonte: tabela 4, apêndice 1).

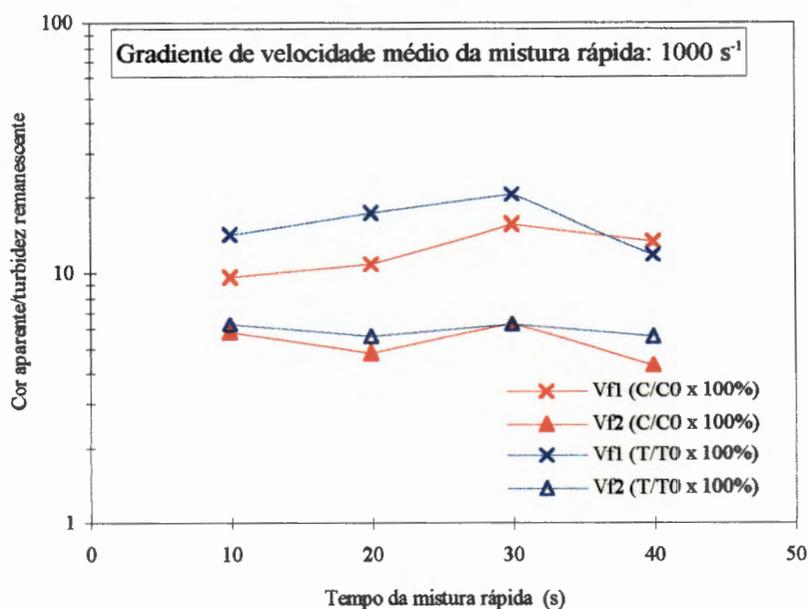


FIGURA 73 - Cor aparente remanescente (C/C0 x 100%) e turbidez remanescente (T/T0 x 100%) em função do tempo de mistura rápida para um gradiente de velocidade médio de mistura rápida= 1000 s<sup>-1</sup>.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida: 6,33 ± 0,1; velocidade de flotação: Vf1= 21,8 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor apar.: 89 a 99 uC; turbidez: 6,5 a 7,8 uT; temp.: 25,0 ± 1,6 °C (Fonte: tabela 4, apêndice 1).

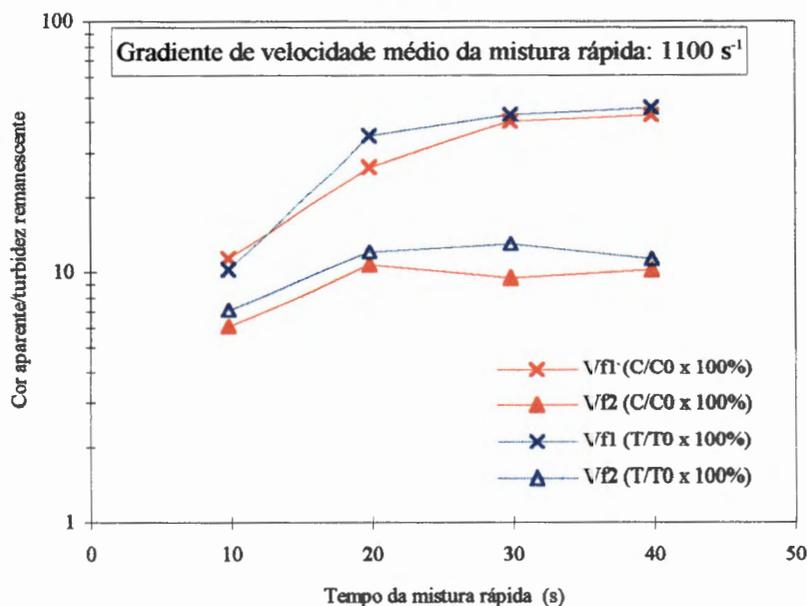


FIGURA 74 - Cor aparente remanescente (C/C0 x 100%) e turbidez remanescente (T/T0 x 100%) em função do tempo de mistura rápida para um gradiente de velocidade médio de mistura rápida= 1100 s<sup>-1</sup>.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida: 6,33 ± 0,1; velocidade de flotação: Vf1= 21,8 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor apar.: 89 a 99 uC; turbidez: 6,5 a 7,8 uT; temp.: 25,0 ± 1,6 °C (Fonte: tabela 4, apêndice 1).

#### 5.2.4 Otimização do tempo e do gradiente de velocidade médio de floculação em ensaios realizados com o equipamento de flotatestes e água tipo I

Nesta etapa foram estudados valores de tempo de floculação ( $T_f$ ) de 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 30 min com valores de gradiente de velocidade médio de floculação ( $G_f$ ) de 20, 40, 60, 80 e 100  $s^{-1}$ . Para tempo de floculação de 2 min foram investigados também valores de gradiente de velocidade médio de floculação de 120, 140, 160 e 180  $s^{-1}$ . As velocidades de flotação utilizadas foram de 21 cm/min ( $\cong$  302 m/d) e 10,4 cm/min ( $\cong$  150 m/d). Os demais parâmetros operacionais utilizados foram os otimizados e mencionados nos itens 5.2.1 a 5.2.3. Os resultados obtidos durante a execução destes ensaios são mostrados nas figuras 75 a 82 que apresentam a cor aparente e a turbidez remanescentes em função do gradiente de velocidade médio de floculação para cada tempo de floculação mencionado.

Os resultados apresentados nas figuras 75 a 82 mostram que com o aumento do tempo de floculação, o respectivo gradiente de velocidade médio de floculação ótimo ( $G_{f_{ot}}$ ) tende a diminuir, o que pode indicar a possibilidade da flotação ter um melhor desempenho com valores decrescentes de  $G_f$  da primeira para a última câmara de floculação, considerando uma unidade com escoamento contínuo. Contudo, na literatura é comentado que, em geral, a diminuição do  $G_f$  em câmaras sucessivas de floculação não implica em melhoria da flotação (ZABEL & HYDE, 1976; REES et al., 1979); existe um consenso que não é necessário  $G_f$  decrescente nas diversas câmaras de floculação, antecedendo a flotação (EDZWALD, 1995); os valores de  $G_f$  devem ser definidos em função da qualidade da água bruta e do tipo de coagulante utilizado (VALLANCE et al., 1995).

Com base nos resultados apresentados nas figuras 75 a 82, pode-se assumir como valores de  $G_{f_{ot}}$  para cada valor de  $T_f$  estudado, os apresentados no quadro 10. Os valores de eficiência de remoção de cor aparente e turbidez para  $V_f = 21$  cm/min e  $V_f = 10,4$  cm/min, para cada par considerado de  $G_{f_{ot}}$  e  $T_f$ , também são apresentados no quadro 8.

QUADRO 8 - Gradiente de velocidade médio de floculação ótimo ( $G_{f_{ot}}$ ) para cada tempo de floculação estudado e respectivos valores de eficiência de remoção de cor aparente e turbidez para  $V_f= 21$  cm/min e  $V_f= 10,4$  cm/min. Ensaio realizados com o equipamento de flotateste e água tipo I

Tf (min)	$G_{f_{ot}}$ ( $s^{-1}$ )	Eficiência de remoção de cor aparente (%)		Eficiência de remoção de turbidez (%)	
		Vel. de flotação (cm/min)		Vel. de flotação (cm/min)	
		10,4	21,0	10,4	21,0
2	160	90,6	82,5	93,2	83,8
4	80	88,8	82,0	90,4	83,8
8	80	93,2	86,4	91,4	82,9
12	80	92,9	88,5	93,8	85,9
16	80	94,0	88,0	95,0	87,3
20	60	95,4	90,2	96,8	91,5
24	60	94,8	91,4	93,9	90,6
30	40	94,8	87,9	95,1	86,6

Diante dos resultados mostrados nas figuras 75 a 82 e quadro 8, verifica-se a obtenção de eficiência de remoção de cor aparente e de turbidez maior ou igual a 82% para todos os valores testados de Tf, com seus respectivos  $G_{f_{ot}}$  e para  $V_f=21$  cm/min. Entretanto, para estas condições, as melhores eficiências de remoção (maiores que 90%) foram obtidas para Tf de 20 e 24 minutos. Por outro lado, para  $V_f= 10,4$  cm/min, obteve-se eficiência de remoção de cor aparente e turbidez acima de 90% para todos os Tf testados com exceção de Tf= 4 min, cuja remoção foi de 88,8% para cor aparente e 90,4% para turbidez. Ainda com relação a  $V_f= 10,4$  cm/min, verifica-se que a maior remoção tanto de cor aparente (95,4%) quanto de turbidez (96,8%), foi proporcionada para Tf= 20 min. Assim, entende-se que na presente pesquisa, o tempo de floculação de 20 minutos pode ser assumido como o tempo de floculação ótimo ( $T_{f_{ot}}$ ). Porém, admitiu-se como tempo de floculação ótimo o tempo de 24 min, visto que, 24 é um número múltiplo de 12 e 8, considerando o

fato que foram testados valores de  $T_f$  de 12 e 8 min e foram programados ensaios na instalação com escoamento contínuo com estes valores de  $T_f$ , os quais poderiam ser comparados com os ensaios realizados no reator estático. Além disso, para  $T_f = 24$  min, a aplicação da metodologia proposta por PÁDUA (1994) foi facilitada no sentido de evitar algumas interpolações (ver item 4.6.7), lembrando contudo que isto não é limitante em tal metodologia, considerando que a unidade de floculação da instalação com escoamento contínuo é composta por três câmaras e um mesmo tempo de floculação foi utilizado para uma, duas ou três câmaras de floculação em série, com valores de  $G_f$  definidos de acordo com a referida metodologia. A utilização dessa metodologia será discutida no próximo item (5.2.5)

Observando-se o quadro 8, é possível verificar que um melhor desempenho da flotação foi obtido para um determinado  $T_f$  (20 min), acima do qual, não houve melhora significativa na eficiência, ou pelo contrário, houve uma ligeira queda no desempenho do processo para tempo de floculação acima de 24 min. Então, conforme já mencionado, para a água em estudo, o tempo de floculação que proporcionou melhor desempenho da flotação foi  $T_f = 20$  min, embora resultados bastante razoáveis tenham sido obtidos para, por exemplo,  $T_f$  de apenas 8 min (remoção de 86,4% e 82,9% de cor aparente e turbidez, respectivamente, para  $V_f = 21$  cm/min) e  $T_f$  de 12 min (88,5% de remoção de cor aparente e 85,9% de remoção de turbidez, para  $V_f = 21$  cm/min).

Assim, pode-se verificar que os resultados obtidos na presente pesquisa, estão de acordo com os mencionados por outros autores (REES et al., 1979; ZABEL, 1984; GREGORY & ZABEL, 1990), no que se refere a tempo de floculação, visando a clarificação por flotação, sendo mencionado tempo de floculação de 20 min para água colorida.

Contudo, conforme já mencionado, adotou-se como  $T_f$  ótimo o tempo de 24 min, o qual foi aplicado na instalação com escoamento contínuo, além de tempos de floculação de 12, 8 e 4 min, o que será mencionado no item 5.3.

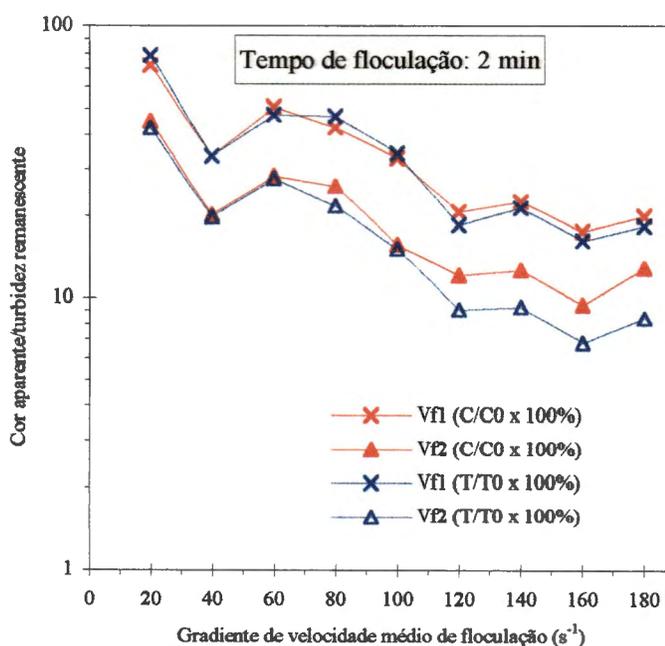


FIGURA 75 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do gradiente de velocidade médio de floculação para tempo de floculação= 2 min.

Ensaios realizados com o equipamento de flotateste e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida:  $6,36 \pm 0,13$ ; velocidade de flotação:  $Vf1 = 21,0$  cm/min,  $Vf2 = 10,4$  cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 84 a 98 uC; turbidez: 6,06 a 7,87 uT; temperatura:  $25,0 \pm 1,4$  °C (Fonte: tabela 5, apêndice 1).

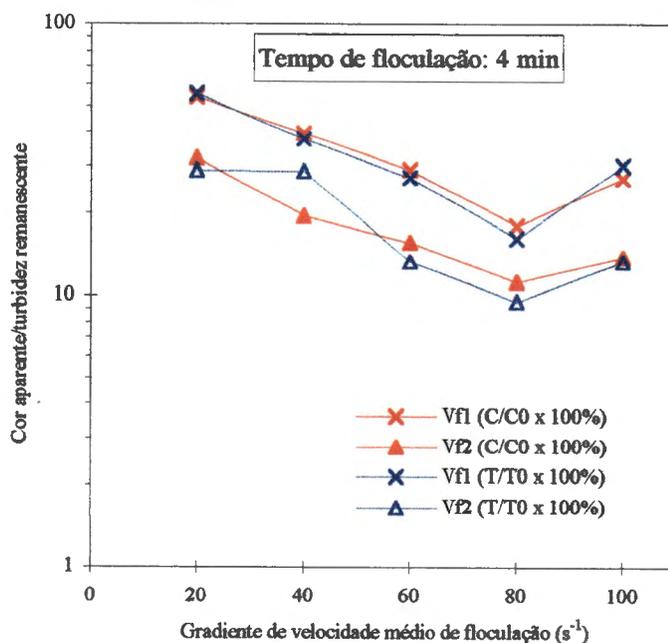


FIGURA 76 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do gradiente de velocidade médio de floculação para tempo de floculação= 4 min.

Ensaios realizados com o equipamento de flotateste e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida:  $6,36 \pm 0,13$ ; velocidade de flotação:  $Vf1 = 21,0$  cm/min,  $Vf2 = 10,4$  cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 84 a 98 uC; turbidez: 6,06 a 7,87 uT; temperatura:  $25,0 \pm 1,4$  °C (Fonte: tabela 5, apêndice 1).

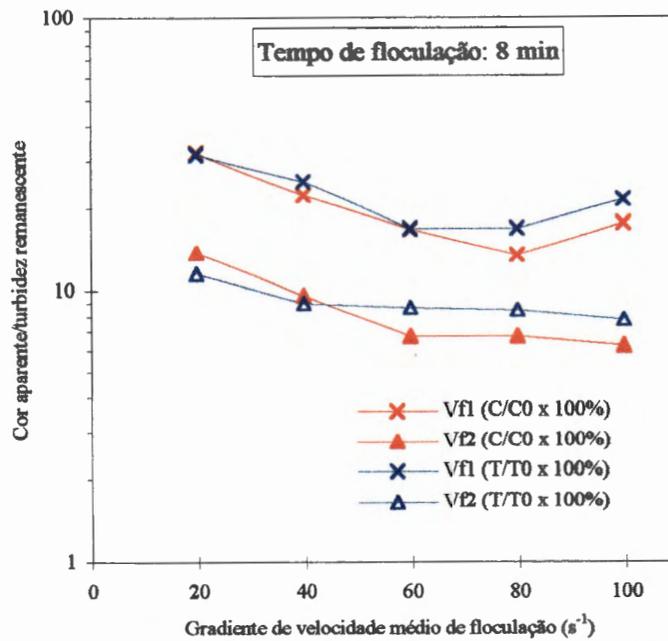


FIGURA 77 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do gradiente de velocidade médio de floculação para tempo de floculação= 8 min.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida:  $6,36 \pm 0,13$ ; velocidade de flotação:  $Vf1 = 21,0$  cm/min,  $Vf2 = 10,4$  cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 84 a 98 uC; turbidez: 6,06 a 7,87 uT; temperatura:  $25,0 \pm 1,4$  °C (Fonte: tabela 5, apêndice 1).

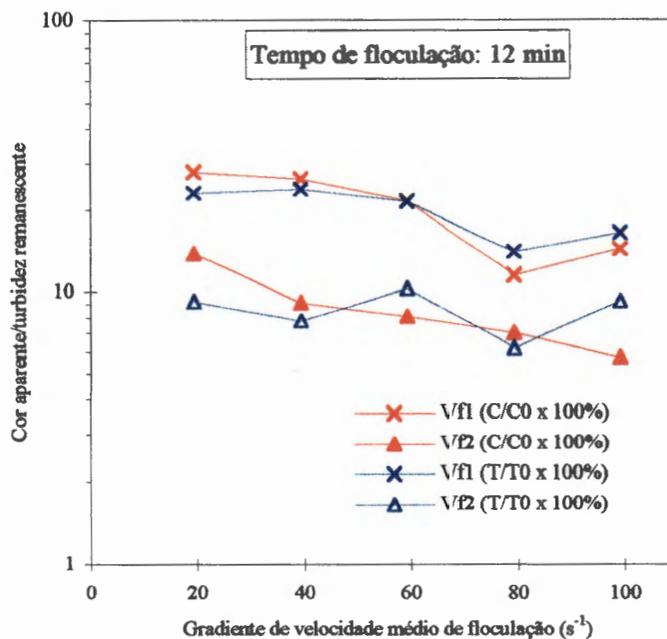


FIGURA 78 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do gradiente de velocidade médio de floculação para tempo de floculação= 12 min.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida:  $6,36 \pm 0,13$ ; velocidade de flotação:  $Vf1 = 21,0$  cm/min,  $Vf2 = 10,4$  cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 84 a 98 uC; turbidez: 6,06 a 7,87 uT; temperatura:  $25,0 \pm 1,4$  °C (Fonte: tabela 5, apêndice 1).

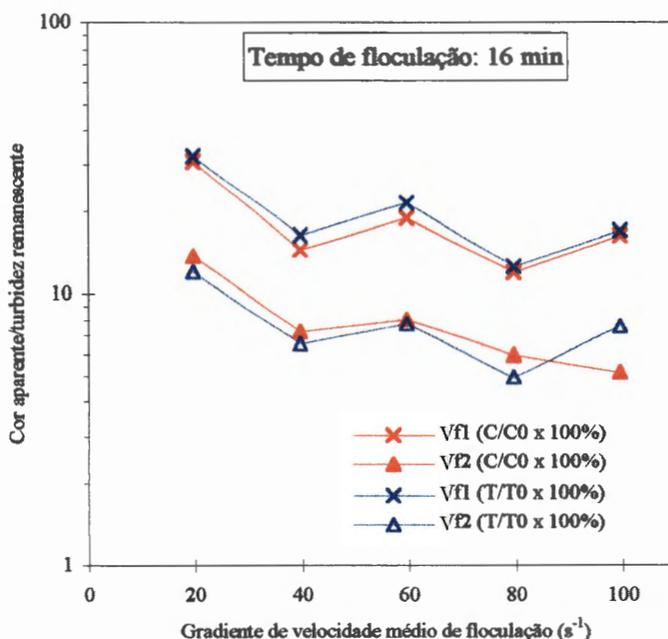


FIGURA 79 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do gradiente de velocidade médio de floculação para tempo de floculação= 16 min.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida:  $6,36 \pm 0,13$ ; velocidade de flotação: Vf1= 21,0 cm/min, Vf2= 10,4 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 84 a 98 uC; turbidez: 6,06 a 7,87 uT; temperatura:  $25,0 \pm 1,4$  °C (Fonte: tabela 5, apêndice 1).

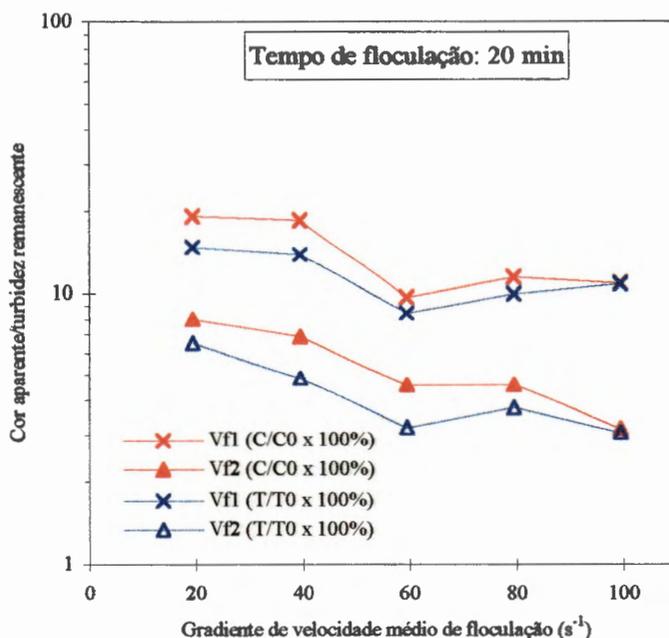


FIGURA 80 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do gradiente de velocidade médio de floculação para tempo de floculação= 20 min.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida:  $6,36 \pm 0,13$ ; velocidade de flotação: Vf1= 21,0 cm/min, Vf2= 10,4 cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 84 a 98 uC; turbidez: 6,06 a 7,87 uT; temperatura:  $25,0 \pm 1,4$  °C (Fonte: tabela 5, apêndice 1).

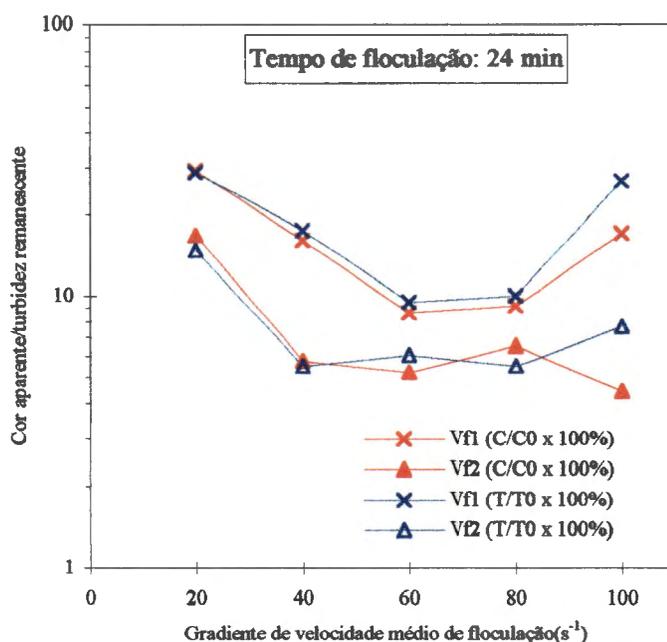


FIGURA 81 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do gradiente de velocidade médio de floculação para tempo de floculação= 24 min.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatest e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida:  $6,36 \pm 0,13$ ; velocidade de flotação:  $Vf1 = 21,0$  cm/min,  $Vf2 = 10,4$  cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 84 a 98 uC; turbidez: 6,06 a 7,87 uT; temperatura:  $25,0 \pm 1,4$  °C (Fonte: tabela 5, apêndice 1).

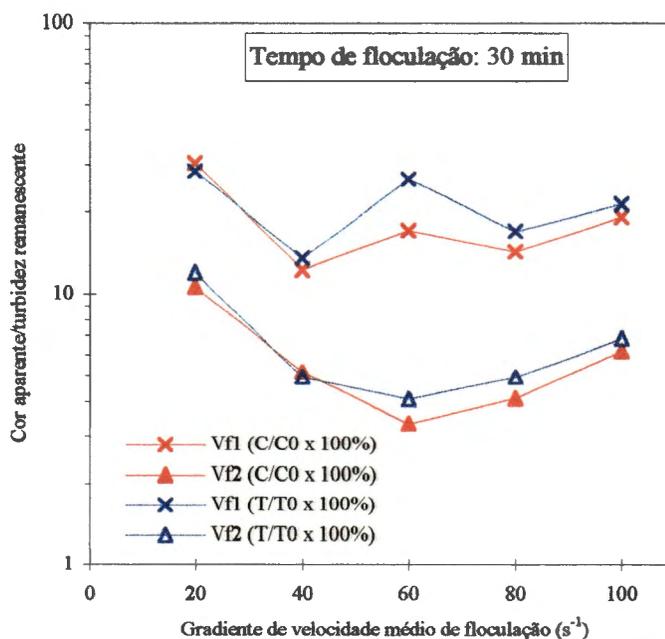


FIGURA 82 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do gradiente de velocidade médio de floculação para tempo de floculação= 30 min.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatest e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida:  $6,36 \pm 0,13$ ; velocidade de flotação:  $Vf1 = 21,0$  cm/min,  $Vf2 = 10,4$  cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 84 a 98 uC; turbidez: 6,06 a 7,87 uT; temperatura:  $25,0 \pm 1,4$  °C (Fonte: tabela 5, apêndice 1).

### 5.2.5 Redução gradual do gradiente de velocidade médio de floculação estudada em ensaios realizados com o equipamento de flotatete e água tipo I

Algumas combinações de valores decrescentes do gradiente de velocidade médio utilizadas ao longo da floculação foram estudadas para tempo de floculação de 24 min e 12 min. Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 83 e 84. Os outros parâmetros operacionais foram mantidos constantes, sendo iguais aos utilizados na etapa anterior (item 5.2.4).

Para cada tempo de floculação utilizado nesta etapa, foram estudadas combinações com três (1/3 do tempo de floculação para cada valor de Gf) e dois (1/2 do tempo de floculação para cada valor de Gf) valores decrescentes de Gf, simulando três e duas câmaras de escoamento contínuo; além de repetir o ensaio com Gf constante ( $G_{f_{ot}}$ ) durante o período de floculação (ensaios L e M da figura 83 e ensaio V da figura 84). Duas combinações de valores decrescentes de Gf foram definidas aleatoriamente (ensaios A, E, F, H e J da figura 83 e ensaios N, R, S e U da figura 84) e uma terceira combinação foi definida através da metodologia proposta por PÁDUA (1994) (ensaios B, C, D, G e I da figura 83 e ensaios O, P, Q e T da figura 84).

De maneira geral, são observadas diferenças entre os resultados obtidos para as diferentes combinações estudadas de Gf, sendo mais acentuadas quando são comparados valores mais extremos de Gf.

Para  $T_f = 24$  min, observa-se na figura 83, eficiência de remoção relativamente baixa para os valores mais baixos de Gf, sendo que para as combinações de 80-60-40  $s^{-1}$  (ensaio E) e 60-40-20  $s^{-1}$  (ensaio F), 8 minutos em cada Gf, obteve-se remoção de cor aparente e turbidez de 70,2% e 67,2%, respectivamente, para  $V_f = 21,0$  cm/min, e 88,5% e 90,6%, respectivamente, para  $V_f = 10,4$  cm/min. A melhor eficiência de remoção para  $V_f = 21$  cm/min ( $\cong 302$  m/d) foi obtida para Gf de 80-60  $s^{-1}$  (ensaio I), 12 min para cada Gf, sendo bastante similar à remoção obtida para Gf constante e igual a 100  $s^{-1}$  (ensaio G), lembrando que esses valores de Gf foram definidos a partir da metodologia proposta por PÁDUA (1994). A combinação de Gf de 80-60  $s^{-1}$  (ensaio I) proporcionou remoção de cor aparente e turbidez de 89,8% e 87,0%,

respectivamente, para  $V_f = 21$  cm/min ( $\cong 302$  m/d) e 96,5% e 94,7%, respectivamente, para  $V_f = 10,4$  cm/min ( $\cong 150$  m/d). Para  $G_f$  mantido constante e igual a  $100$  s<sup>-1</sup> (ensaio G), foi obtida eficiência de remoção de cor aparente de 88,4% e, de turbidez de 86,1% para  $V_f = 21$  cm/min; sendo que para  $V_f = 10,4$  cm/min, a eficiência de remoção de cor aparente foi de 95,7% e de turbidez foi de 94,5%. Portanto, pode-se concluir que a combinação de valores decrescentes de  $G_f$  igual a 80-60 s<sup>-1</sup> (ensaio I), 12 min para cada valor de  $G_f$ , foi a ótima para  $T_f = 24$  min, apesar de ter sido obtida eficiência de remoção ligeiramente superior de cor aparente (97,0%) e de turbidez (96,0%) com valor constante de  $G_f = 60$  s<sup>-1</sup> (ensaio M), para  $V_f = 10,4$  cm/min.

Para  $T_f = 12$  min (figura 84) também é observada eficiência de remoção relativamente baixa de cor aparente (78,5%) e de turbidez (66,3%) para  $G_f$  de 60-40-20 s<sup>-1</sup> (ensaio R), 4 min para cada  $G_f$ , e  $V_f = 21,0$  cm/min. Considerando a remoção de cor aparente para  $V_f = 21$  cm/min ( $\cong 302$  m/d), verifica-se que o melhor desempenho da flotação (85,5% de remoção de cor aparente) foi obtido para a combinação de  $G_f$  de 80-60 s<sup>-1</sup> (ensaio T), 6 min por  $G_f$ , definida pela metodologia de PÁDUA (1994). Para  $V_f = 10,4$  cm/min ( $\cong 150$  m/d), os maiores valores de eficiência de remoção de cor aparente (95,2 a 95,4%) foram obtidos para combinações de  $G_f$  de 120-100-80 s<sup>-1</sup> (ensaio N, combinação definida arbitrariamente); 80-60 s<sup>-1</sup> (ensaio T, combinação definida através da metodologia de PÁDUA, 1994) e 80 s<sup>-1</sup> (ensaio V); sendo que dentre essas três combinações, a maior eficiência de remoção de turbidez (94,2%) foi obtida para  $G_f$  mantido constante e igual a 80 s<sup>-1</sup> (ensaio V), o que foi praticamente equivalente à remoção de turbidez (94,0%) proporcionada pela combinação de 120-100-80 s<sup>-1</sup> (ensaio N). Assim, verifica-se que para  $T_f = 12$  min, os melhores resultados foram obtidos para valores decrescentes de  $G_f$  de 80-60 s<sup>-1</sup> (ensaio T), 6 min para cada valor de  $G_f$ .

Observando-se as figuras 83 e 84, percebe-se que, para os dois tempos de floculação estudados (24 e 12 min), as melhores eficiências de remoção foram obtidas para valores decrescentes de  $G_f$ , comparando-se com valor constante de  $G_f$ ; contudo, não mostrando diferenças extremamente significativas.

Com base nos resultados apresentados nas figuras 83 e 84, verifica-se claramente que melhores desempenhos da flotação foram obtidos para valores de  $G_f$  relativamente altos, podendo-se admitir entre 60 e 100  $s^{-1}$  para a água em estudo, o que está, relativamente, de acordo com trabalhos apresentados na literatura (HAARHOFF & VAN VUUREN, 1995, recomendam valores entre 50 a 120  $s^{-1}$ ; REES et al., 1979, ZABEL, 1984 e GREGORY & ZABEL, 1990, mencionam valores ótimos de 70 a 75  $s^{-1}$ ; VALLANCE et al., 1995, encontraram valores de 50 a 125  $s^{-1}$ ).

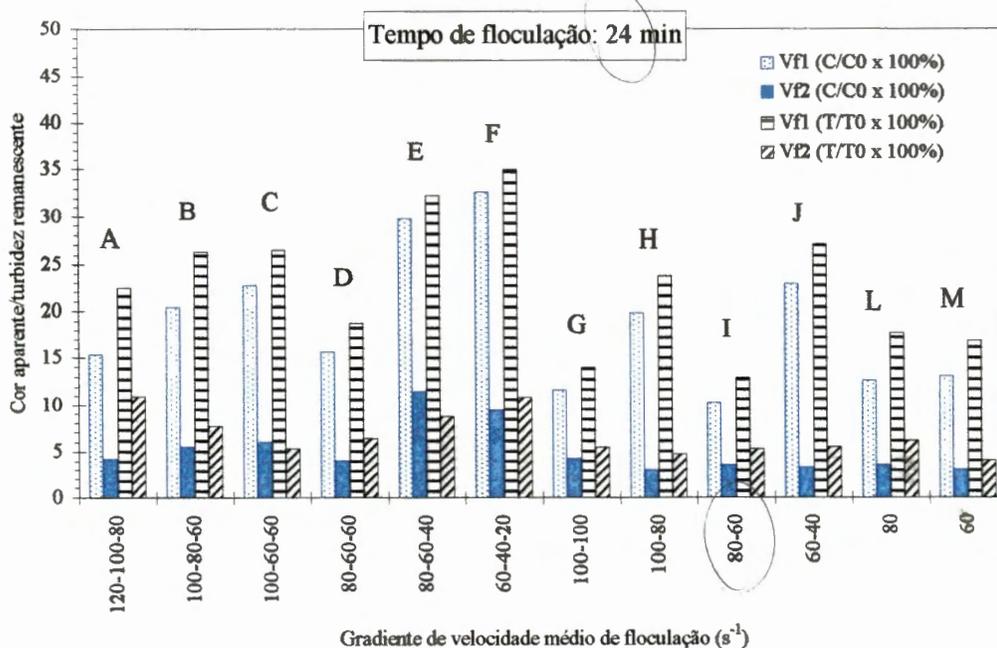


FIGURA 83 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação para tempo de floculação= 24 min.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida:  $6,37 \pm 0,10$ ; velocidade de flotação:  $Vf_1 = 21,0$  cm/min,  $Vf_2 = 10,4$  cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 78 a 95 uC; turbidez: 5,66 a 6,25 uT; temperatura:  $25,2 \pm 0,8$  °C (Fonte: tabela 6, apêndice 1).

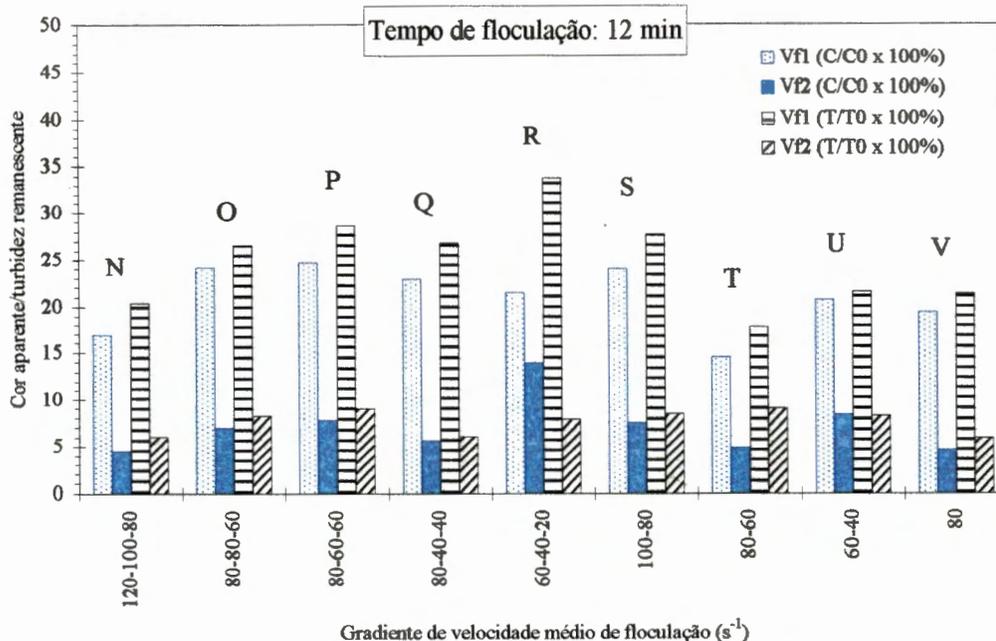


FIGURA 84 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) e turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação para tempo de floculação= 12 min.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo I. Dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida:  $6,37 \pm 0,10$ ; velocidade de flotação:  $Vf_1 = 21,0$  cm/min,  $Vf_2 = 10,4$  cm/min; fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 78 a 95 uC; turbidez: 5,66 a 6,25 uT; temperatura:  $25,2 \pm 0,8$  °C (Fonte: tabela 6, apêndice 1).

### 5.3 Resultados dos ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo para a água tipo I

O objetivo dos ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo com a água tipo I foi verificar a influência na flotação dos seguintes parâmetros relacionados à floculação: gradiente de velocidade médio de floculação, tempo de detenção e número de compartimentos na unidade de floculação. Foram estudados valores de tempo de floculação de 4, 8, 12 e 24 min; número de compartimentos da unidade de floculação de uma, duas ou três câmaras em série e escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação com combinações entre 20 e 140 s<sup>-1</sup>.

A variação dos valores de gradiente de velocidade médio de floculação foi estudada somente para valores de tempo de floculação de 12 e 24 min. Para valores de tempo de floculação de 4 e 8 min, o valor do gradiente de velocidade médio de floculação foi mantido constante e igual a 80 s<sup>-1</sup>, valor este definido como ótimo nos ensaios realizados com equipamento de flotateste (item 5.2.4).

Para valores de tempo de floculação de 12 e 24 min foram utilizados, no mínimo, quatro escalonamentos do gradiente de velocidade médio de floculação para duas ou três câmaras de floculação em série, sendo um escalonamento com valor constante de gradiente de velocidade médio de floculação e três escalonamentos com valores decrescentes de gradiente de velocidade médio de floculação (quadro 9, a seguir). Tais escalonamentos do gradiente de velocidade médio foram estudados no equipamento de flotateste (ver item 5.2.5).

Em todos os ensaios foram mantidos constantes os seguintes parâmetros: dosagem de sulfato de alumínio= 40 mg/L e pH de coagulação= 6,37 ± 0,15 (definidos nos ensaios realizados com o equipamento de flotateste, item 5.2.1, e ensaios preliminares à cada carreira de operação); temperatura= 27,4 ± 1,1 °C; pressão na câmara de saturação= 441 ± 5 kPa; quantidade de ar fornecida (Sp\*p)= 3,88 ± 0,28 g de ar/ m<sup>3</sup> de água. O valor de Sp\*p, em torno de 4 g de ar/m<sup>3</sup> de água, foi definido de acordo com resultados obtidos por REALI & MARCHETTO (1996),

cuja água de estudo e instalação com escoamento contínuo foram as mesmas utilizadas na presente pesquisa. Contudo, é importante comentar que os resultados obtidos por REALI & MARCHETTO (1996), mostram um valor ótimo de  $Sp \cdot p$  de, aproximadamente, 4 g de ar/m<sup>3</sup> de água, para TAS aparente na câmara de flotação de 268, 366 e 538 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia e, em torno de 6 g de ar/m<sup>3</sup> de água, para TAS aparente de 1104 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia, sendo que, conforme será comentado, na presente pesquisa foram utilizadas TAS aparente de  $363 \pm 6$ ,  $425$ ,  $537 \pm 6$  e  $714 \pm 6$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia. A utilização de diferentes valores de TAS aparente foi devido à condições impostas por limitação de equipamentos ou aspectos de projeto da câmara de flotação (ver itens 4.7 e 4.7.1).

Conforme já mencionado (item 4.7.1), os ensaios foram agrupados em diversas carreiras de maneira que durante cada carreira de operação, não fosse necessário obstruir ou abrir os espaçamentos entre as placas na câmara de flotação, considerando que, a variação do tempo de detenção na unidade de floculação implicou na variação da vazão afluyente e, conseqüentemente, na velocidade de escoamento entre as placas ( $V_{placas}$ ) ou taxa de aplicação superficial aparente (TAS aparente) na câmara de flotação. Dessa forma, os resultados obtidos em cada ensaio são apresentados por carreira de operação (figuras 85 a 106) e na mesma seqüência em que foram executados, apesar de que, em determinadas carreiras de operação os ensaios não são diretamente comparáveis. Nas figuras 85 a 106 são apresentados parâmetros operacionais de cada ensaio, características da água de estudo, medidas do pH de coagulação e temperatura, assim como os resultados obtidos ao longo de cada carreira de ensaios. Os resultados são apresentados em termos de valores absolutos e remoção de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais do efluente.

Assim, para facilitar a visualização de todos os ensaios realizados, o quadro 9, a seguir, apresenta um resumo com os melhores resultados obtidos, identificando as principais características dos ensaios, carreira de operação e número da figura referente a cada caso. Informações adicionais são apresentadas nos Apêndices 2a e 2b, tais como características gerais de cada carreira de operação e tabelas referentes aos resultados apresentados neste item sob a forma de gráficos, respectivamente.

QUADRO 9 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo para a água tipo I:

Tempo teórico de floculação-Tf- (min)	TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	Veloc. de escoam. entre as placas - V <sub>placas</sub> (cm/min)	Número de Reynolds entre as placas	Número de câmaras de floculação utilizadas	Gradiente de velocidade médio de floculação em 1, 2 ou 3 câmaras em série- Gf- (s <sup>-1</sup> )	Vazão afluente (L/h)- Água estudo+Produtos químicos	Maior eficiência de remoção obtida (%)			Ensaio	Figura	Tabela (Apêndice 2b)	Carreira de operação
							Cor aparente	Turbidez	Sólidos susp. totais-SST-				
24	357 a 359	31	366 a 368	3	60 - 60 - 60	871	87,3	85,6	91,8	A2	91	13	7
					80 - 60 - 60	871	90,5	90,5	95,3	A1	91	13	7
					120 - 100 - 80	868	88,1	87,0	91,4	A3	94	16	10
					60 - 40 - 20	868	88,7	88,7	92,2	A4	94	16	10
					60 - 60 - 60	868	91,1	90,0	92,7	A2	94	16	10
				2	100 - 80	580	90,2	87,9	95,8	B1	85	7	1
					80 - 60	580	92,0	90,4	97,4	B2	85	7	1
					60 - 40	580	92,0	90,0	96,7	B3	85	7	1
					60 - 60	577	89,6	88,9	93,8	B4	87	9	3
					60	289	81,4	82,7	87,0	C1	89	11	5
12	358 a 368	31 a 32	367 a 377	2	100 - 80	1164	86,0	86,7	90,9	D1	95	17	11
					80 - 60	1164	81,8	83,3	89,6	D2	95	17	11
					60 - 40	1158	78,7	80,7	85,3	D3	96	18	12
					80 - 80	1158	75,5	76,2	84,8	D4	96	18	12
					80 - 60	1157	67,6	65,6	78,9	D2	98	20	14
					60 - 40	1157	68,1	64,4	80,2	D3	98	20	14
					120 - 100	1167	70,8	72,6	86,8	D5	105	27	21
					100 - 80	1167	64,2	63,9	73,0	D1	105	27	21
					140 - 120	1167	63,8	62,5	73,0	D6	105	27	21
					100 - 80	1157	75,3	74,3	85,4	D1	106	28	22
	120 - 100	1157	69,0	64,2	82,2	D5	106	28	22				
	1	80	583	72,9	74,1	86,4	E1	88	10	4			
	708 a 720	62 a 63	726 a 738	3	80 - 40 - 40	1728	47,0	40,3	70,0	F1	92	14	8
					120 - 100 - 80	1728	40,0	33,5	55,0	F2	92	14	8
					60 - 40 - 20	1726	54,8	44,1	61,0	F3	93	15	9
					80 - 80 - 80	1726	44,9	35,5	51,2	F4	93	15	9
					80 - 40 - 40	1720	33,6	26,0	60,4	F1	101	23	17
					120 - 100 - 80	1720	31,4	21,2	60,6	F2	101	23	17
					80 - 40 - 40	1741	32,1	20,3	57,9	F1	102	24	18
120 - 100 - 80					1741	34,1	27,1	56,1	F2	102	24	18	
2					80 - 60	1165	77,3	75,3	84,0	G1	86	8	2
					80 - 80	1165	80,9	78,8	85,4	G2	86	8	2
	100 - 80	1160	68,7	70,3	79,4	G3	103	25	19				
	60 - 40	1160	60,8	63,8	73,8	G4	103	25	19				
	120 - 100	1160	64,0	66,1	76,6	G5	103	25	19				
1	80	577	78,8	79,5	85,4	H1	89	11	5				
8	358	31	367	1	80	871	63,5	61,1	77,1	J1	91	13	7
	531 a	46 a	545 a	1	80	880	70,1	70,3	75,8	J2	88	10	4
	543	47	556	2	80 - 80	1721	51,2	47,6	65,1	I1	97	19	13
				2	80 - 80	1737	35,4	30,7	49,9	I1	104	26	20
4	425	37	435	1	80	1720	26,7	17,4	61,2	L3	100	22	16
	531	46	545		80	1722	35,1	26,2	58,6	L2	99	21	15
	720	63	738		80	1751	34,2	25,2	54,4	L1	90	12	6

Embora os principais parâmetros como tempo de floculação, gradiente de velocidade médio de floculação, quantidade de ar fornecida para a flotação e TAS aparente (velocidade de escoamento ou número de Reynolds entre as placas) na câmara de flotação tenham sido relativamente bem controlados, após a realização de diversos ensaios, percebeu-se a influência da vazão afluyente sobre o tempo de detenção na zona de contato, na câmara de flotação. A zona de contato na câmara de flotação refere-se à região onde a vazão de recirculação (água saturada com ar à pressão de  $\cong 441$  kPa, nesta pesquisa) é inserida na câmara de flotação. A função da zona de contato é promover contatos entre as bolhas de ar e os flocos formados previamente na unidade de floculação. Então, considerando constante o volume da zona de contato, o tempo de detenção nesta, variou diretamente em função da variação da vazão afluyente à câmara de flotação.

Foi possível admitir a influência significativa do tempo de contato entre os flocos e as bolhas de ar sobre o desempenho da flotação, após a repetição de diversos ensaios. Assim, tanto nas figuras 85 a 106, quanto no quadro 9, são apresentados valores da vazão afluyente total (vazão da água de estudo mais vazão de produtos químicos) à instalação com escoamento contínuo. No quadro 9 verifica-se a variação da vazão afluyente em função do número de compartimentos utilizados na câmara de floculação, para determinados valores de TAS aparente na câmara de flotação.

Alguns ensaios repetidos (ensaios F1, F2, apresentados nas figuras 92, 101 e 102) referem-se aos ensaios com tempo de floculação de 12 min e TAS aparente na câmara de flotação de  $714 \pm 6$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia, onde foram obtidos melhores resultados para uma ou duas câmaras de floculação do que com três câmaras. Para o tempo de floculação de 8 min, o ensaio I1 (figuras 97 e 104), com TAS aparente de 531 a 536 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia e dois compartimentos de floculação, o ensaio também foi repetido.

Devido à influência da vazão afluyente sobre o desempenho global da flotação, os ensaios de F a H (ver quadro 9) inicialmente programados para a verificação da influência da compartimentação da unidade de floculação no desempenho da flotação, serão discutidos em função do tempo de floculação e gradiente de velocidade médio de floculação.

Analisando-se as figuras 85 a 106 e o quadro 9, pode-se admitir que valores de vazão afluyente até, aproximadamente, 870 L/h, não influenciaram significativamente o desempenho da flotação, em função da variação do tempo de contato entre bolhas de ar e flocos, considerando que quanto maior a vazão afluyente utilizada, menor o tempo de detenção na zona de contato. Dessa forma, as possíveis comparações entre os diversos ensaios serão efetuadas considerando-se os valores de vazão afluyente, sendo que os ensaios com vazão afluyente até 870 L/h, aproximadamente, serão considerados como insignificamente afetados pela variação da vazão.

Os ensaios realizados com apenas uma câmara de floculação, para tempo de floculação igual a 24 min (ensaio C1), 12 min (ensaio E1) e 8 min (ensaio J1), com valores equivalentes de vazão afluyente e TAS aparente ( $\cong 360 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{dia}$ ), mostram que remoção de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais (SST) acima de 80% foi obtida somente no ensaio com tempo de floculação de 24 min (ensaio C1). O ensaio C1 apresentou remoção de 81,4% de cor aparente, 82,7% de turbidez e 87,0% de SST. Outros ensaios realizados com apenas uma câmara de floculação para tempo de floculação de 12 min com TAS aparente de  $\cong 710 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{dia}$  (ensaio H1) e para tempo de floculação de 4 min com TAS aparente de 425, 531 e  $720 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{dia}$  (ensaios L3, L2 e L1, respectivamente) apresentaram eficiência de remoção de cor aparente em torno de 78% para tempo de floculação de 12 min e, entre 26 e 34% para 4 min de floculação. Assim, verifica-se que os melhores resultados obtidos utilizando-se uma câmara de floculação, foi para tempo de floculação de 24 min com TAS aparente de  $\cong 360 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{dia}$ . No entanto, analisando-se os resultados obtidos com tempo de floculação de 24 min com uma, duas ou três câmaras de floculação em série (ver quadro 9), pode-se concluir que, embora tenha sido obtida eficiência de remoção acima de 80% com uma câmara de floculação, o ideal para bom desempenho da flotação na clarificação da água estudada, foi duas câmaras de floculação em série, considerando tempo de floculação de 24 min.

Com relação a duas câmaras de floculação, é possível comparar duas categorias de ensaios com tempo de floculação de 12 min: categoria D e categoria G. A principal diferença entre as categorias de ensaios D e G, refere-se ao valor da TAS

aparente na câmara de flotação, sendo de, aproximadamente, 360 e 710 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia, respectivamente. Os resultados obtidos para os ensaios da categoria G (TAS aparente  $\cong$  710 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia) foram ligeiramente inferiores aos resultados apresentados pelos ensaios da categoria D (TAS aparente  $\cong$  360 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia). O melhor desempenho da flotação para os ensaios da categoria G foi obtido para o ensaio G2 (figura 86) cujo escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação foi de 80-80 s<sup>-1</sup>, apresentando eficiência de remoção 80,9% de cor aparente, 78,8% de turbidez e 85,4% de SST. Os resultados apresentados pelo ensaio G2 foram bastante próximos aos apresentados pelo ensaio G1 (figura 86), cujo escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação foi de 80-60 s<sup>-1</sup>.

Para os ensaios da categoria D (Tf= 12 min, número de compartimentos de floculação= 2 e TAS aparente  $\cong$  360 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia), os maiores valores de eficiência de remoção foram obtidos para o ensaio D1 (figura 95), com 86,0% de remoção de cor aparente, 86,7% de remoção de turbidez e 90,9% de remoção de SST. Contudo, o ensaio D1, bem como o ensaios D2 e D3, foram repetidos (figuras 98, 105 e 106) posteriormente (com objetivo de representarem o “branco”, permitindo comparações com outros valores investigados do escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação); tendo apresentado menores valores de eficiência de remoção, da ordem de 64 a 75% de remoção de cor aparente, 63 a 74% de remoção de turbidez e 73 a 85% de SST, para o ensaio D1. Diante desses fatos, entende-se que o desempenho da flotação, nos ensaios da categoria D, não foi afetado significativamente em função da variação do escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação, para as combinações estudadas (entre 40 e 140 s<sup>-1</sup>).

Em função da discussão levantada para os ensaios da categoria D, acredita-se que para as condições dos ensaios, tanto da categoria D, quanto da categoria G, o desempenho da flotação esteve extremamente suscetível à parâmetros como tempo de floculação e tempo de detenção na zona de contato, não permitindo a avaliação em termos da variação do escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação. Contudo, analisando-se os ensaios da categoria D e categoria G, nos quais a vazão afluyente foi, em torno, de 1160 L/h, tempo de floculação de 12 min com duas câmaras de floculação, pode-se concluir que o desempenho da flotação foi

relativamente independente do valor da TAS aparente na câmara de flotação, visto que a relação entre os valores de TAS aparente para os ensaios da categoria D e categoria G foi de aproximadamente 1:2. De maneira geral, pode-se assumir remoção de cor aparente e turbidez entre 60 e 80% e de SST entre 73 e 85% para ambas categorias, desconsiderando os resultados apresentados na figura 95, conforme já discutido.

Todos os ensaios realizados com tempo de floculação = 12 min, 3 câmaras de floculação e TAS aparente  $\cong 710 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{dia}$  (categoria de ensaios F, cuja vazão afluente foi de 1728 a 1741 L/h), apresentaram baixa eficiência de remoção, situando-se entre 30 a 54% de remoção de cor aparente, 20 e 40% de turbidez e 50 e 70% de remoção de SST. Tais ensaios confirmam que o desempenho da flotação foi afetado marcadamente pelo aumento da vazão afluente, ou seja, pelo aumento da velocidade de passagem na zona de contato bolhas-partículas do reator.

Os ensaios realizados com  $T_f = 24$  min, TAS aparente  $\cong 360 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{dia}$ , com duas ou três câmaras de floculação (categorias de ensaios A e B), apresentaram resultados relativamente próximos: entre 87 e 92% de remoção de cor aparente, de 85 a 90% de remoção de turbidez e entre 91 a 97% de remoção de SST. Nos ensaios da categoria A, ou seja, para três câmaras de floculação, os melhores resultados de eficiência de remoção de cor aparente, turbidez e SST (acima de 90%) foram obtidos para os ensaios com escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação de  $80\text{-}60\text{-}60 \text{ s}^{-1}$  (ensaio A1, figura 91) e  $60\text{-}60\text{-}60 \text{ s}^{-1}$  (ensaio A2, figura 94). O ensaio A2, mostrado na figura 94, é uma repetição do ensaio A2, mostrado na figura 91, pois na primeira vez em que foi realizado, observou-se uma tendência de melhora do desempenho a partir dos resultados da última coleta (ver figura 91), contudo o ensaio já tinha sido encerrado antes de tal verificação. Assim, admitiu-se que os resultados obtidos para o ensaio A2 são os apresentados na figura 94. Com relação aos ensaios da categoria B (duas câmaras de floculação), resultados de eficiência de remoção acima de 90% de cor aparente, turbidez e SST foram obtidos para os ensaios com os seguintes escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação:  $80\text{-}60 \text{ s}^{-1}$  (ensaio B2, figura 85) e  $60\text{-}40 \text{ s}^{-1}$  (ensaio B3, figura 85). No entanto, verifica-se que os melhores resultados (remoção de 92,0% de cor aparente, 90,4% de turbidez e

97,4% de SST) foram obtidos para o ensaio B2 (figura 85), ou seja, duas câmaras de floculação e escalonamento do gradiente de velocidade médio de  $80-60 \text{ s}^{-1}$ .

Observando-se o conjunto dos ensaios efetuados com a instalação com escoamento contínuo, nota-se que para tempo de floculação de 24 min (categorias A e B de ensaios), a influência do escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação sobre o desempenho da flotação foi menor que para o tempo de floculação de 12 min (categorias D, F e G de ensaios). Portanto, verifica-se ser importante a otimização do escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação, principalmente para pequenos tempos de floculação.

De maneira geral, para o tipo de água estudada nessa etapa de ensaios (cor moderadamente elevada e baixa turbidez), o tempo de floculação em torno de 24 min (categorias de ensaios A e B, no quadro 9), apresentou os melhores resultados no que diz respeito a remoção de cor aparente (até 92,0%), turbidez (até 90,4%) e SST (até 97,4%). Os ensaios realizados com 12 min de floculação (categorias D, F e G de ensaios), apresentaram resultados ligeiramente inferiores, observando-se remoção de até 86,0% de cor aparente, até 86,7% de remoção de turbidez e até 90,9% de remoção de SST. Entretanto, como durante os ensaios com 12 min de floculação a velocidade de passagem na região de contato bolhas-partículas não pôde ser mantida com valores próximos aqueles verificados nos ensaios com 24 min de floculação (devido a limitação do equipamento), não é possível qualquer comparação conclusiva a respeito de qual foi o tempo mínimo admissível para obtenção de boas condições de floculação para esse tipo de água. No entanto, se forem considerados também os resultados dos ensaios efetuados com o equipamento de flotateste, verifica-se que, para as melhores condições de floculação em termos de gradiente de velocidade médio, os ensaios com 12 min de floculação forneceram resultados ligeiramente inferiores que aqueles obtidos nos ensaios com 24 min, permitindo supor-se que o tempo mínimo de floculação adequado para esse tipo de água esteja no intervalo compreendido entre 12 e 24 min. No próximo item é apresentada discussão mais detalhada com relação aos resultados globais dos ensaios com a água tipo I, ou seja, ensaios realizados com o equipamento de flotateste e com a instalação com escoamento contínuo.

Variáveis Investigadas	Ensaio B1	Ensaio B2	Ensaio B3
Nº de câmaras de floculação	2	2	2
Tempo teórico de floc. (min)	24	24	24
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	100	80	60
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	60	40
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-	-
Vazão afluyente (L/h)	580	580	580
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	359	359	359
Veloc. entre as placas (cm/min)	31	31	31
Nº de Reynolds entre as placas	368	368	368

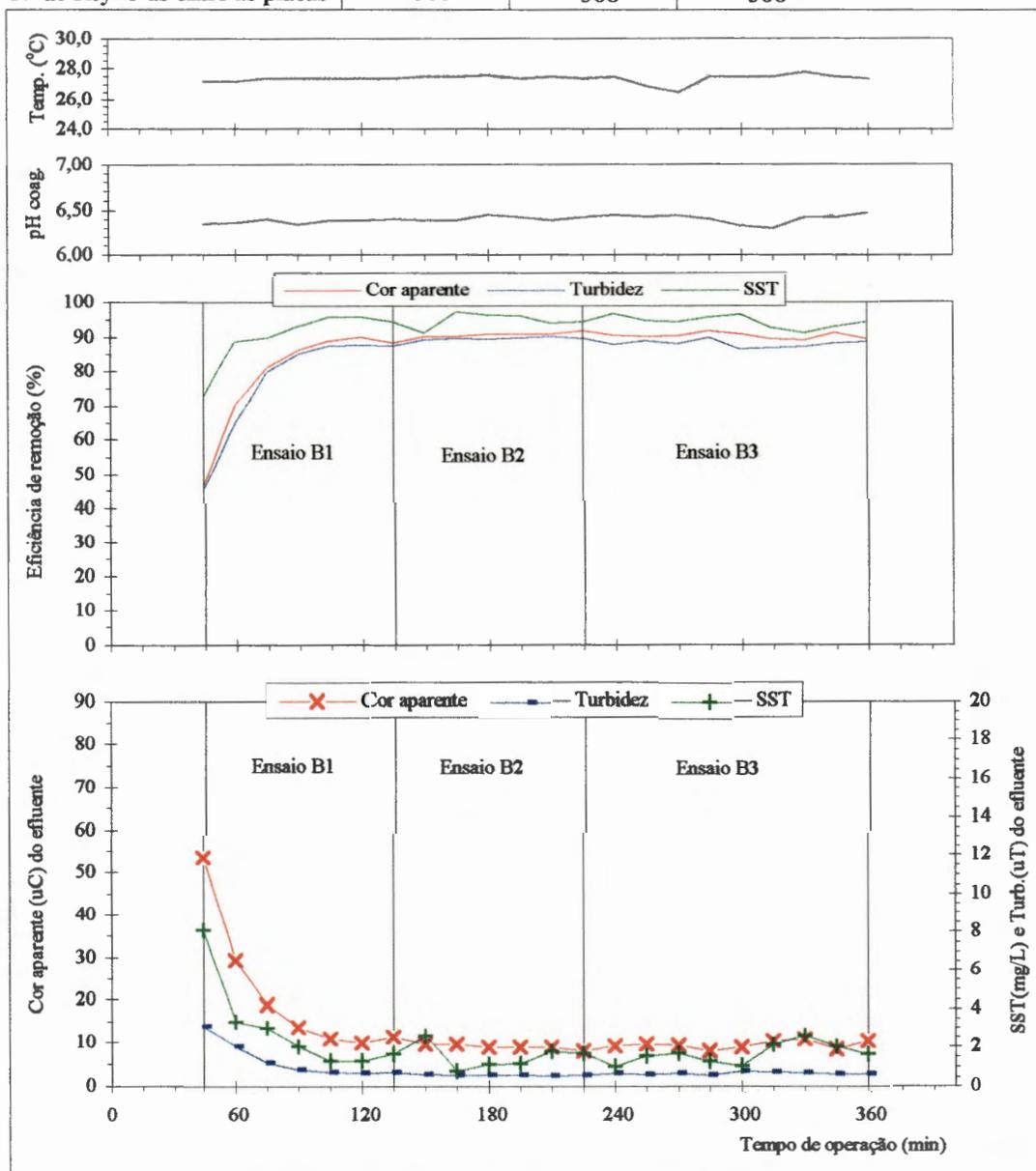


FIGURA 85 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 1 da instalação com escoamento contínuo (ensaios B1, B2 e B3) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 7, apêndice 2b).

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 100 uC	SST: 30 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 58 uC	SSF: 22,7 mg/L	Sp*p: 3,74 ± 0,14 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 5,7 uT	SSV: 7,3 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio G1	Ensaio G2
Nº de câmaras de floculação	2	2
Tempo teórico de floc. (min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	60	80
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Vazão afluyente (L/h)	1165	1165
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	720	720
Veloc. entre as placas (cm/min)	63	63
Nº de Reynolds entre as placas	738	738

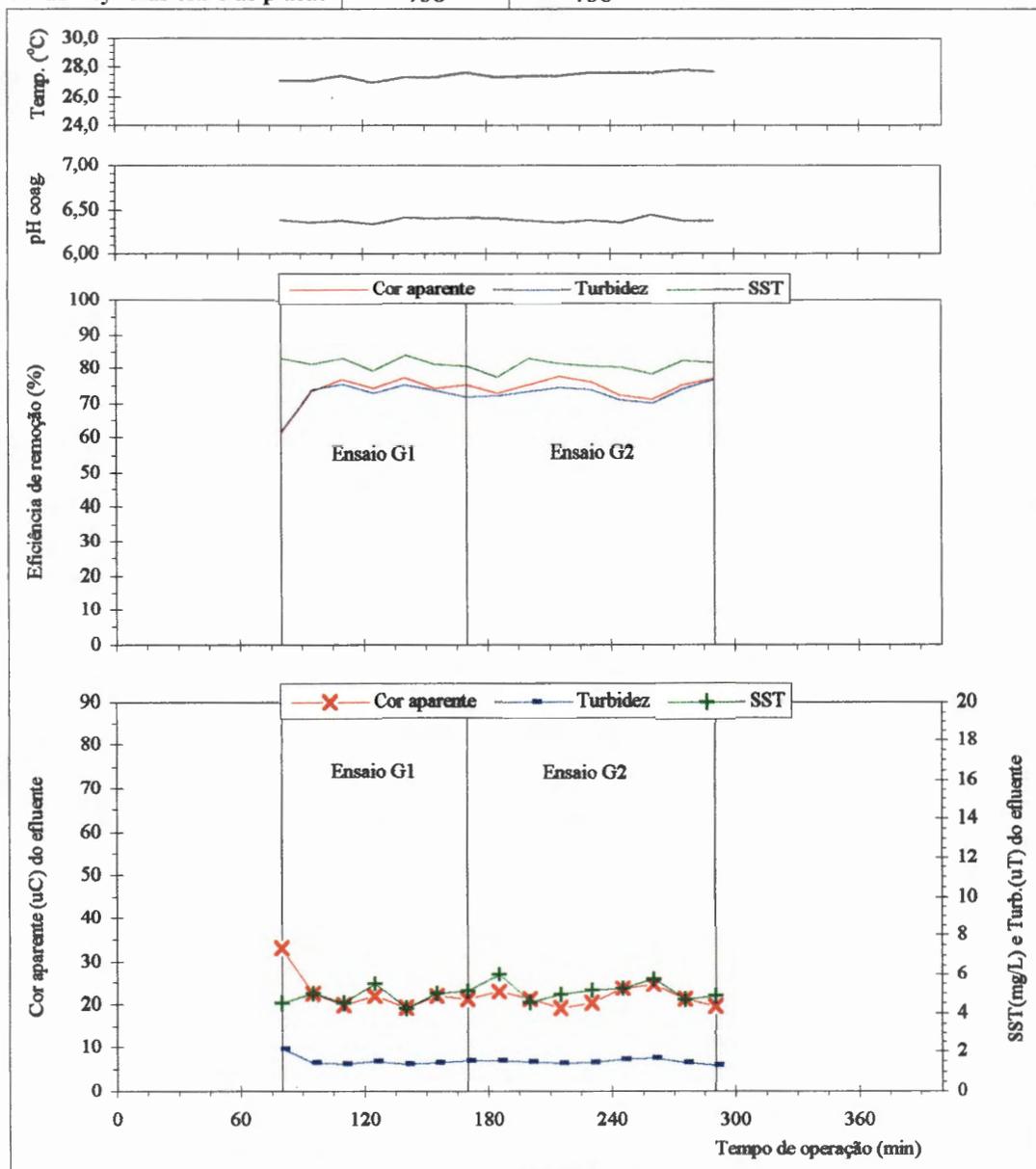


FIGURA 86 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 2 da instalação com escoamento contínuo (ensaios G1 e G2) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 8, apêndice 2b).

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 85 uC	SST: 26,5 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 42 uC	SSF: 19 mg/L	Sp*p: 3,77 ± 0,06 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 5,51 uT	SSV: 7,5 mg/L	

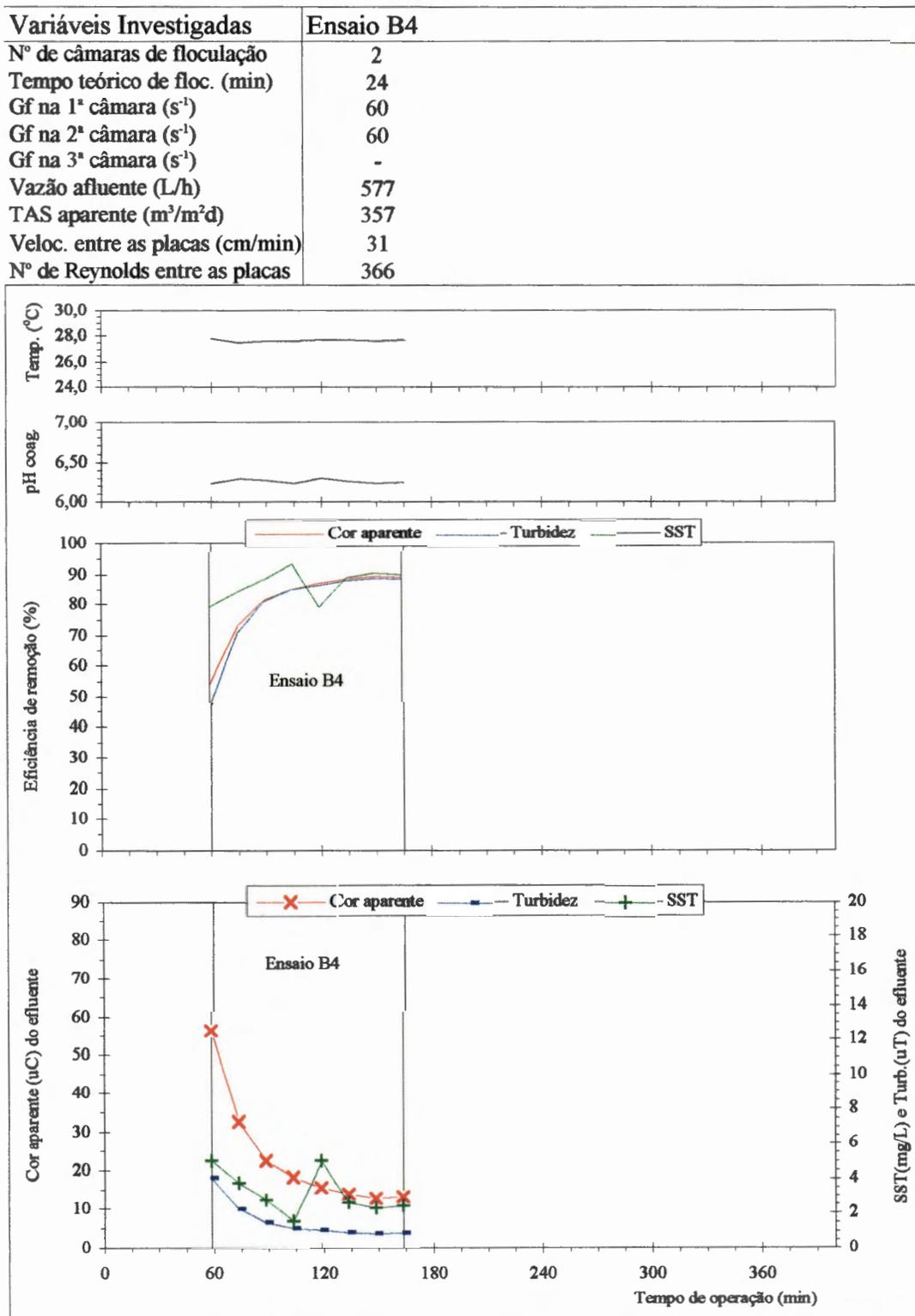


FIGURA 87 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 3 da instalação com escoamento contínuo (ensaio B4) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 9, apêndice 2b).

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 122 uC	SST: 24 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 55 uC	SSF: 19 mg/L	Sp*p: 3,74 ± 0,09 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 7,56 uT	SSV: 5 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio J2	Ensaio E1
Nº de câmaras de floculação	1	1
Tempo teórico de floc. (min)	8	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Vazão afluyente (L/h)	880	583
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	543	368
Veloc. entre as placas (cm/min)	47	32
Nº de Reynolds entre as placas	556	377

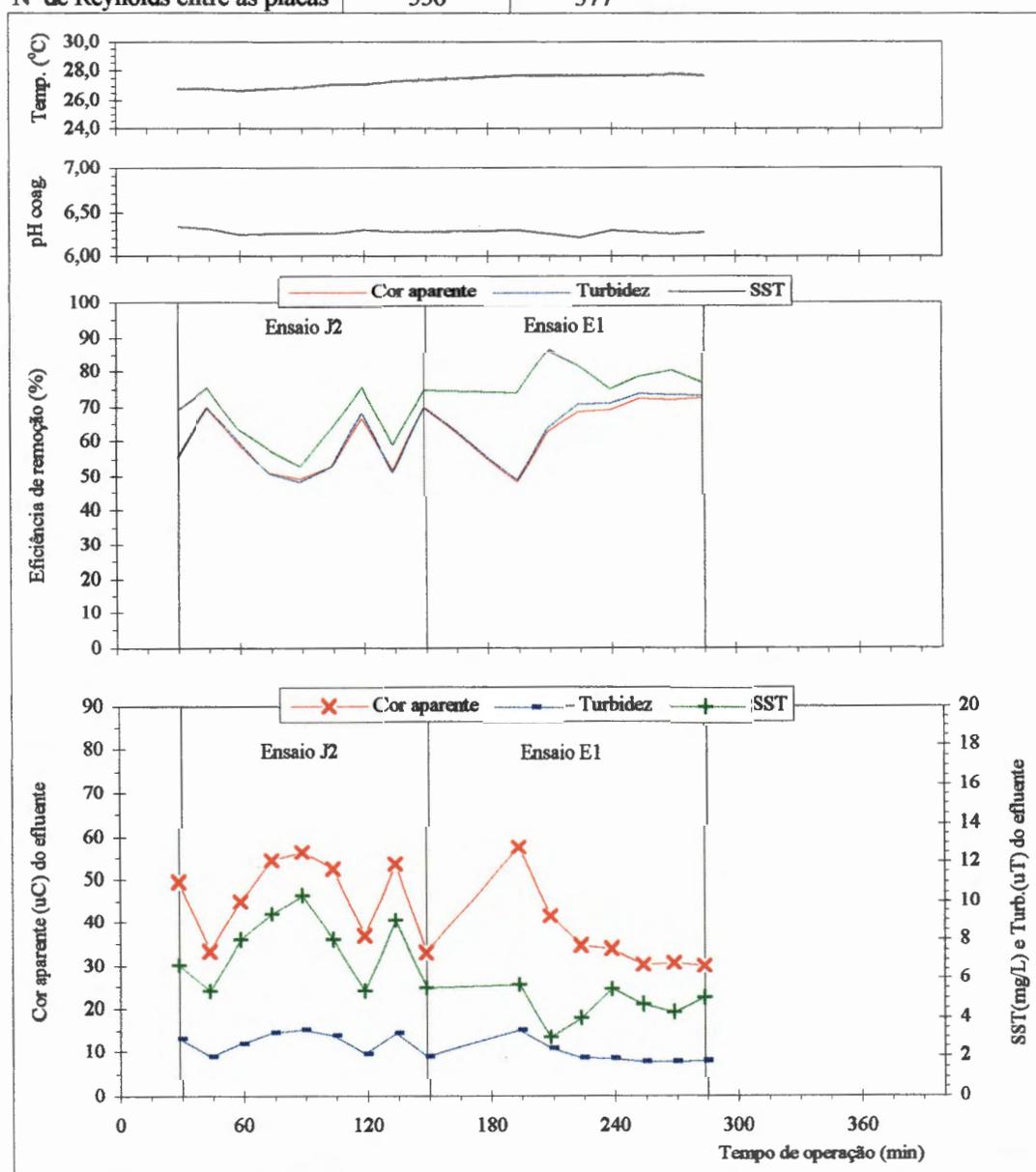


FIGURA 88 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 4 da instalação com escoamento contínuo (ensaios J2 e E1) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 10, apêndice 2b).

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 111 uC	SST: 22 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 57 uC	SSF: 16 mg/L	Sp*p: 3,73 ± 0,13 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 6,6 uT	SSV: 6 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio C1	Ensaio H1
Nº de câmaras de floculação	1	1
Tempo teórico de floc. (min)	24	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	60	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Vazão afluyente (L/h)	289	577
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	357	708
Veloc. entre as placas (cm/min)	31	62
Nº de Reynolds entre as placas	366	726

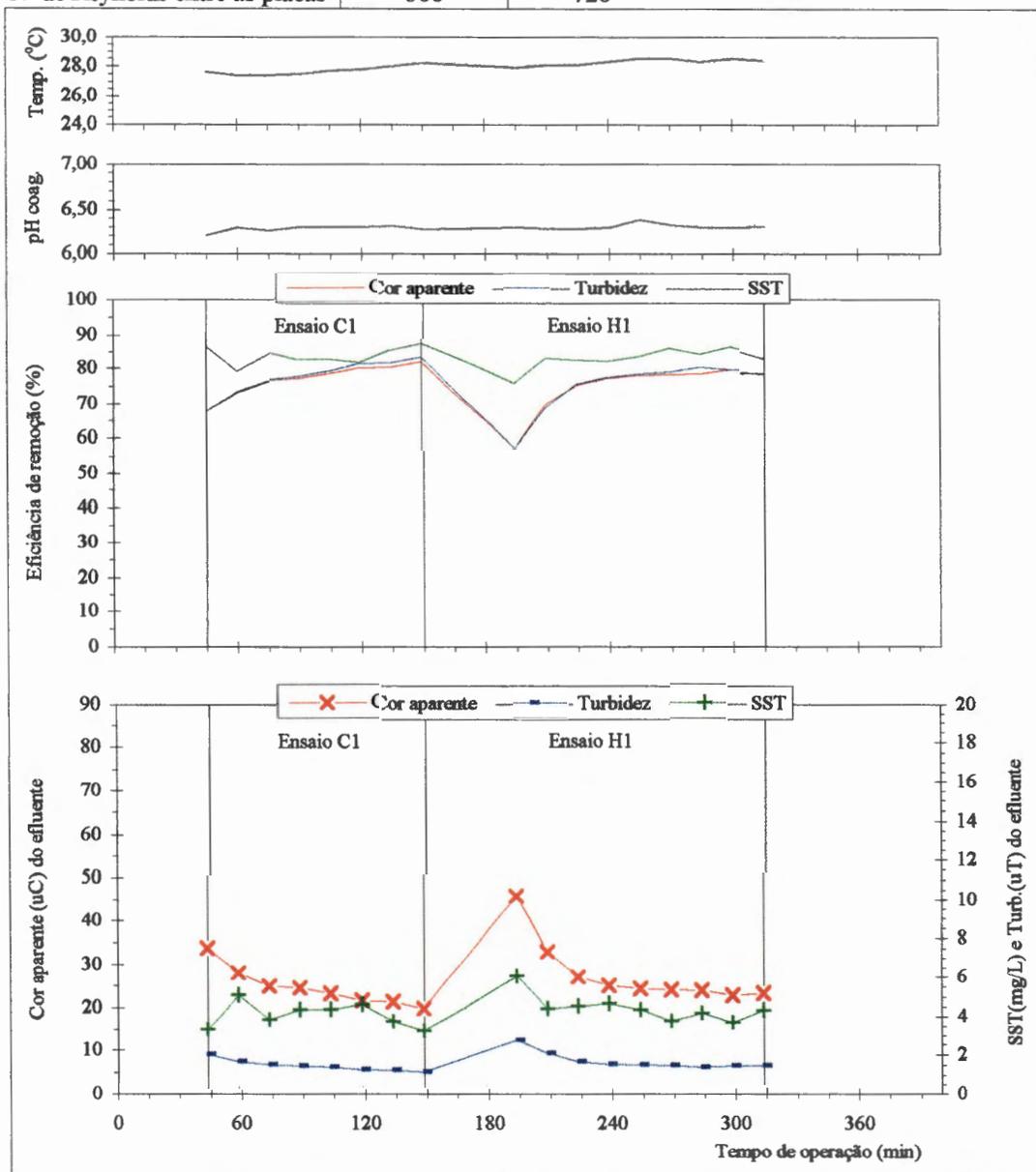


FIGURA 89 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 5 da instalação com escoamento contínuo (ensaios C1 e H1) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 11, apêndice 2b).

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 104 uC	SST: 24 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 57 uC	SSF: 18 mg/L	Sp*p: 3,88 ± 0,27 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 5,96 uT	SSV: 6 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio L1
Nº de câmaras de floculação	1
Tempo teórico de floc. (min)	4
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-
Vazão afluyente (L/h)	1751
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	720
Veloc. entre as placas (cm/min)	63
Nº de Reynolds entre as placas	738

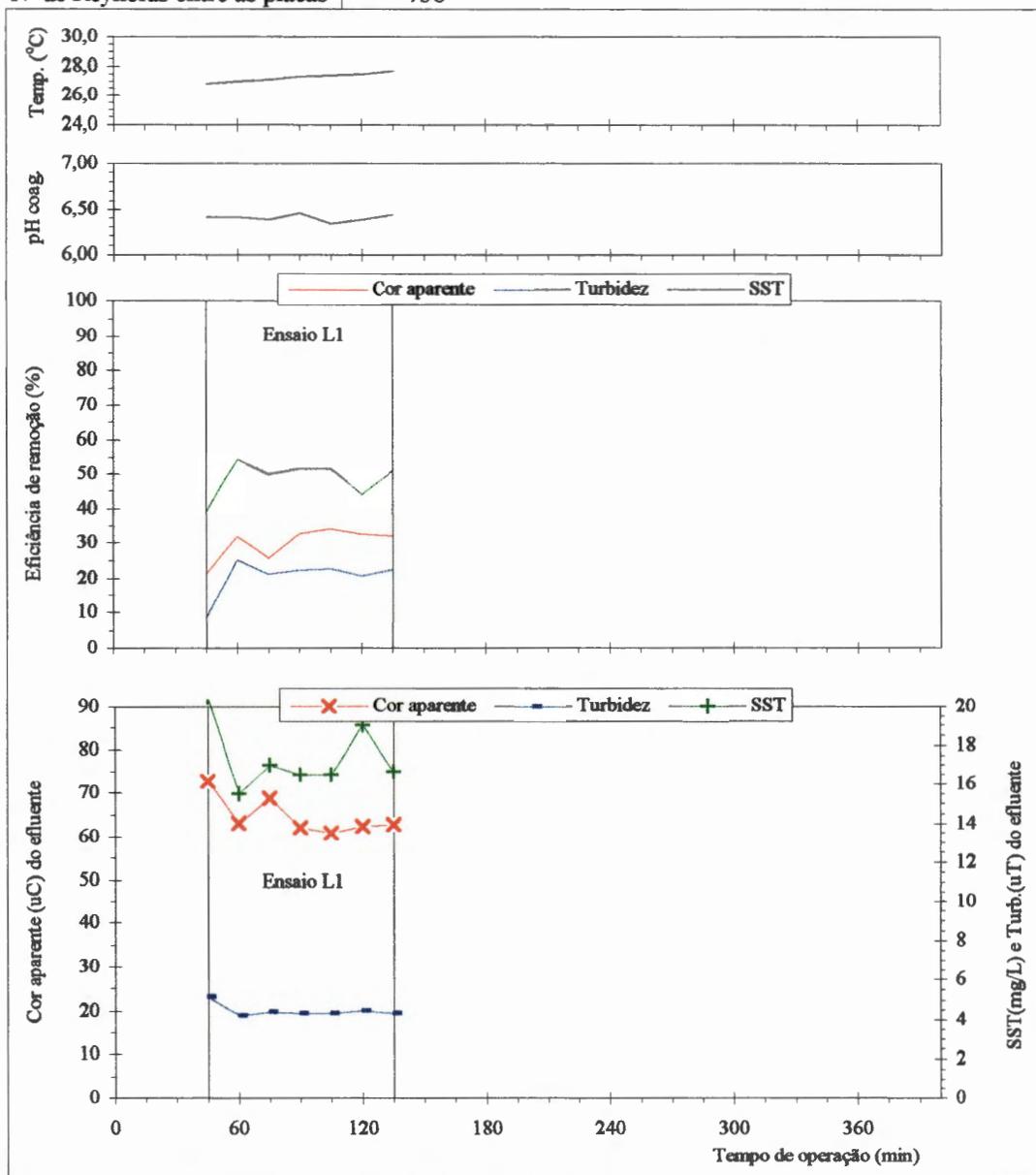


FIGURA 90 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 6 da instalação com escoamento contínuo (ensaio L1) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 12, apêndice 2b).

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 92 uC	SST: 34 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 49 uC	SSF: 24 mg/L	Sp*p: 3,73 ± 0,04 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 5,64 uT	SSV: 10 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio J1	Ensaio A2	Ensaio A1
Nº de câmaras de floculação	1	3	3
Tempo teórico de floc. (min)	8	24	24
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	60	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	60	60
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	60	60
Vazão afluyente (L/h)	871	871	871
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	358	358	358
Veloc. entre as placas (cm/min)	31	31	31
Nº de Reynolds entre as placas	367	367	367

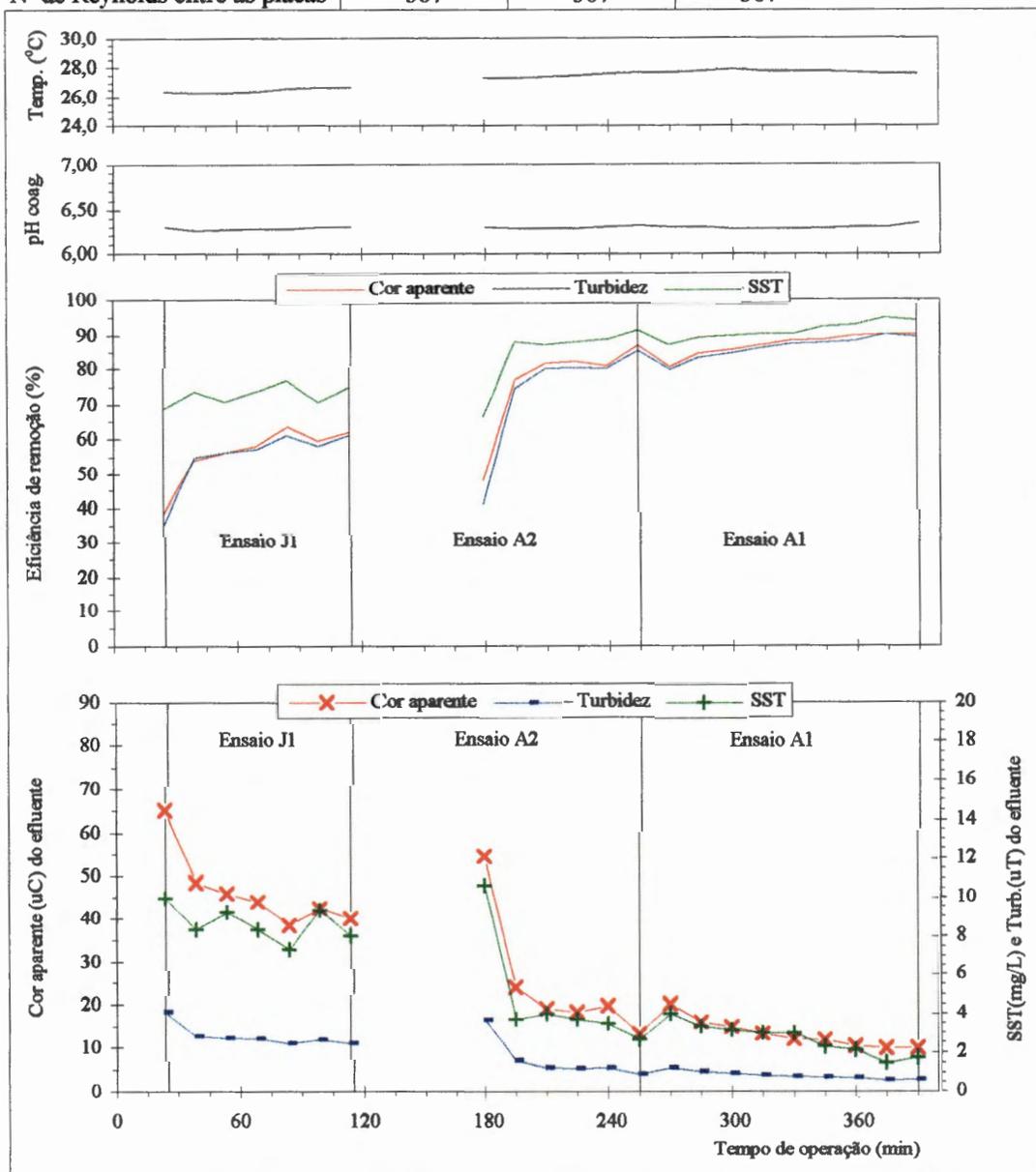


FIGURA 91 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 7 da instalação com escoamento contínuo (ensaios J1, A2 e A1) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 13, apêndice 2b).

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 106 uC	SST: 32 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 56 uC	SSF: 24,3 mg/L	Sp*p: 3,79 ± 0,09 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 6,3 uT	SSV: 7,7 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio F1	Ensaio F2
Nº de câmaras de floculação	3	3
Tempo teórico de floc. (min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	120
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	40	100
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	40	80
Vazão afluente (L/h)	1728	1728
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	711	711
Veloc. entre as placas (cm/min)	62	62
Nº de Reynolds entre as placas	729	729

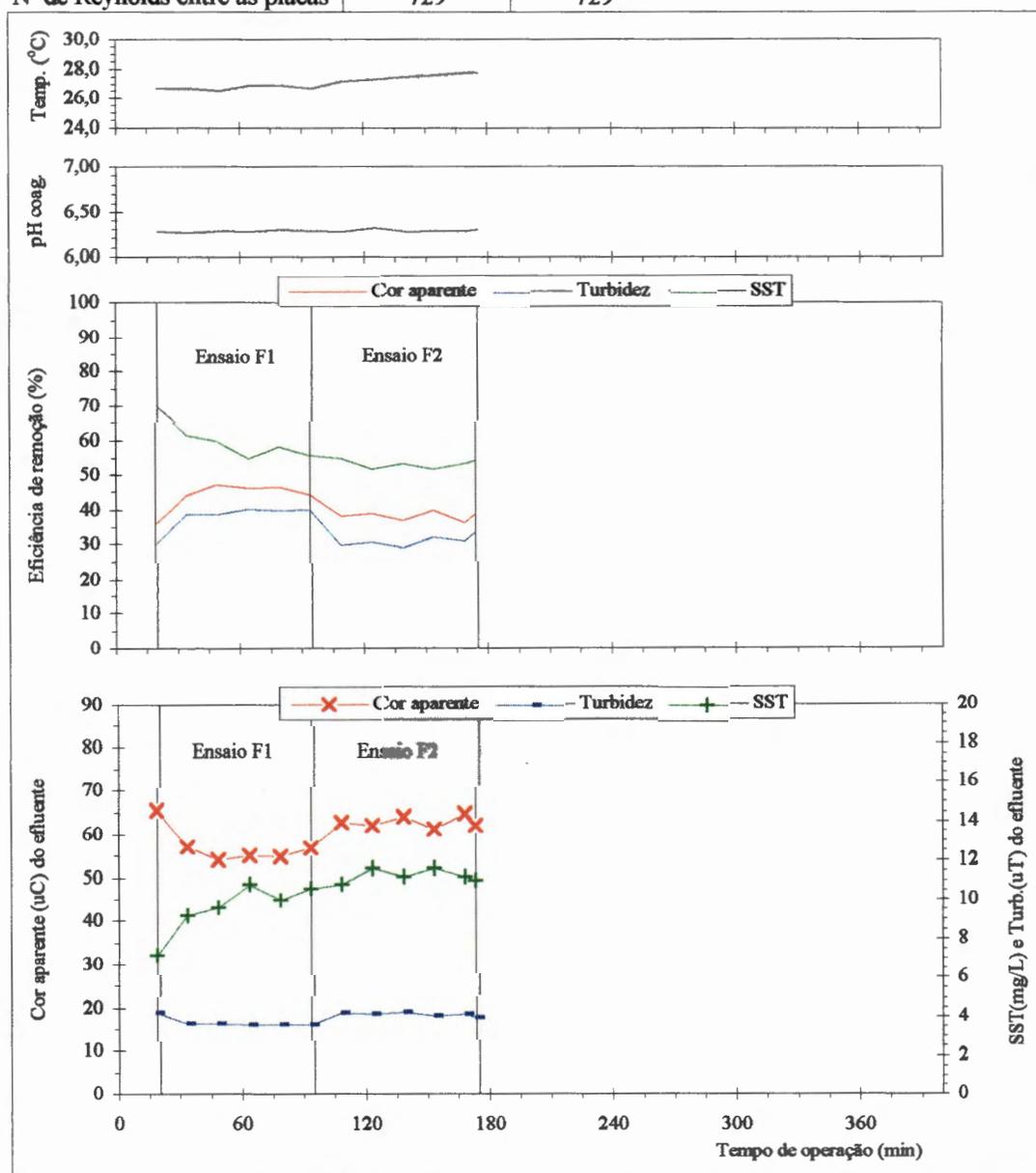


FIGURA 92 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 8 da instalação com escoamento contínuo (ensaios F1 e F2) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 14, apêndice 2b).

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 102 uC	SST: 24 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 58 uC	SSF: 20 mg/L	Sp*p: 3,82 ± 0,07 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 6 uT	SSV: 4 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio F3	Ensaio F4
Nº de câmaras de floculação	3	3
Tempo teórico de foc. (min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	60	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	40	80
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	20	80
Vazão afluyente (L/h)	1726	1726
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	710	710
Veloc. entre as placas (cm/min)	62	62
Nº de Reynolds entre as placas	728	728

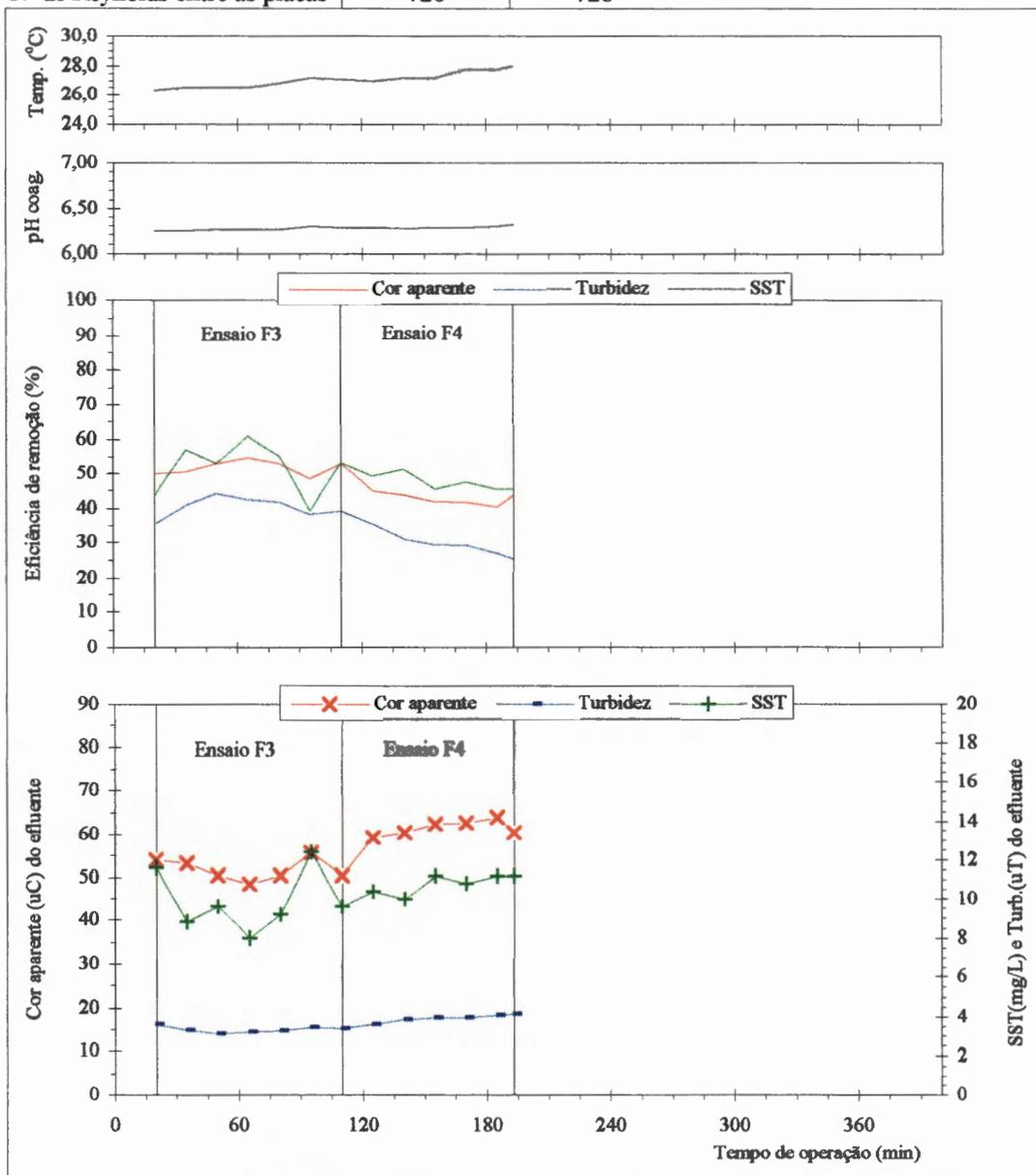


FIGURA 93 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 9 da instalação com escoamento contínuo (ensaios F3 e F4) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 15, apêndice 2b).

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 108 uC	SST: 20,5 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 58 uC	SSF: 17 mg/L	Sp*p: 3,81 ± 0,1 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 5,6 uT	SSV: 3,5 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio A3	Ensaio A4	Ensaio A2
Nº de câmaras de floculação	3	3	3
Tempo teórico de floc. (min)	24	24	24
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	120	60	60
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	100	40	60
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	20	60
Vazão afluente (L/h)	868	868	868
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	357	357	357
Veloc. entre as placas (cm/min)	31	31	31
Nº de Reynolds entre as placas	366	366	366

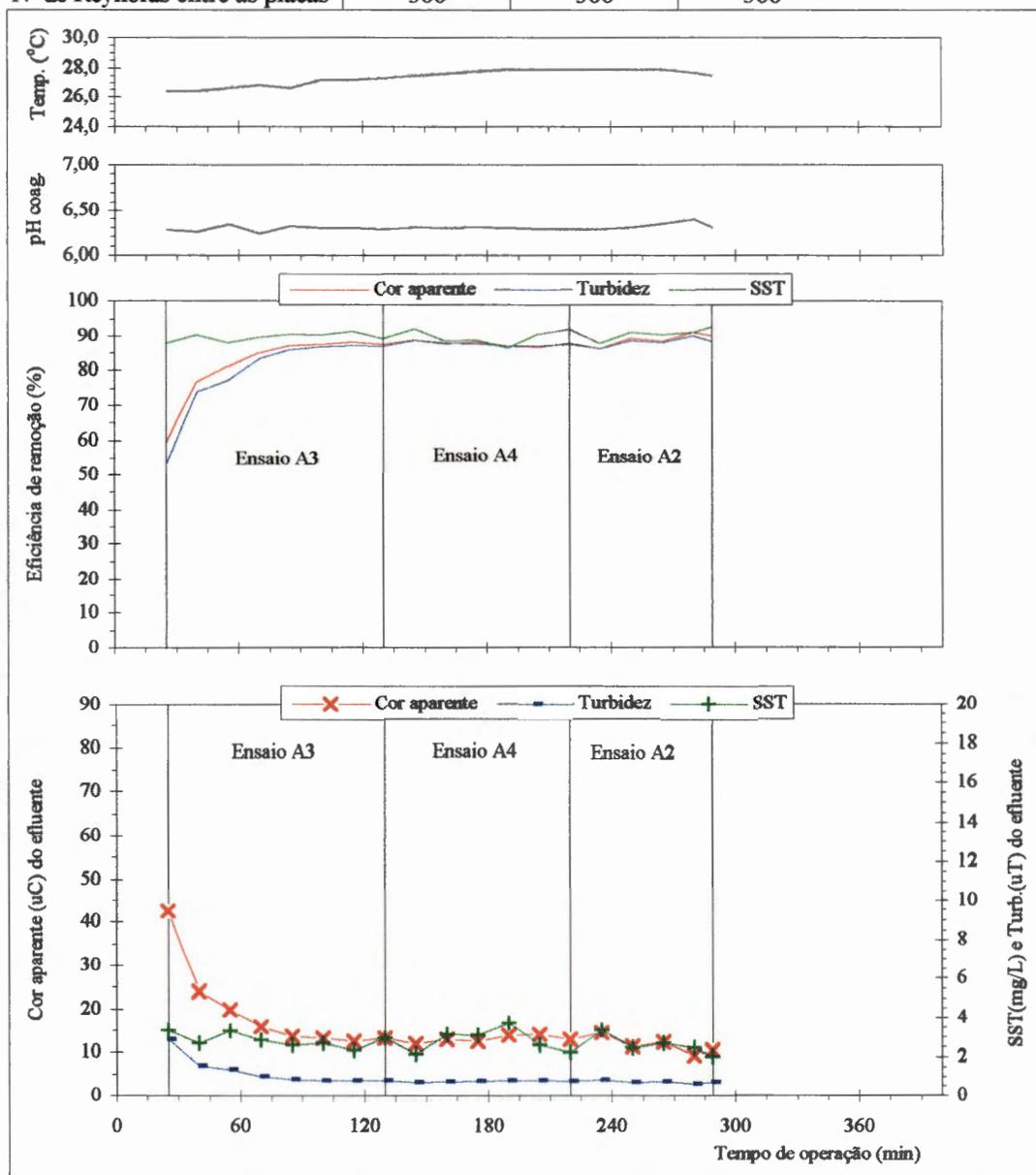


FIGURA 94 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 10 da instalação com escoamento contínuo (ensaios A3, A4 e A2) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 16, apêndice 2b).

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 105 uC	SST: 27,3 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 60 uC	SSF: 20,1 mg/L	Sp*p: 3,8 ± 0,08 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 6,08 uT	SSV: 7,1 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio D1	Ensaio D2
Nº de câmaras de floculação	2	2
Tempo teórico de floc. (min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	100	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	60
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Vazão afluyente (L/h)	1164	1164
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	360	360
Veloc. entre as placas (cm/min)	31	31
Nº de Reynolds entre as placas	369	369

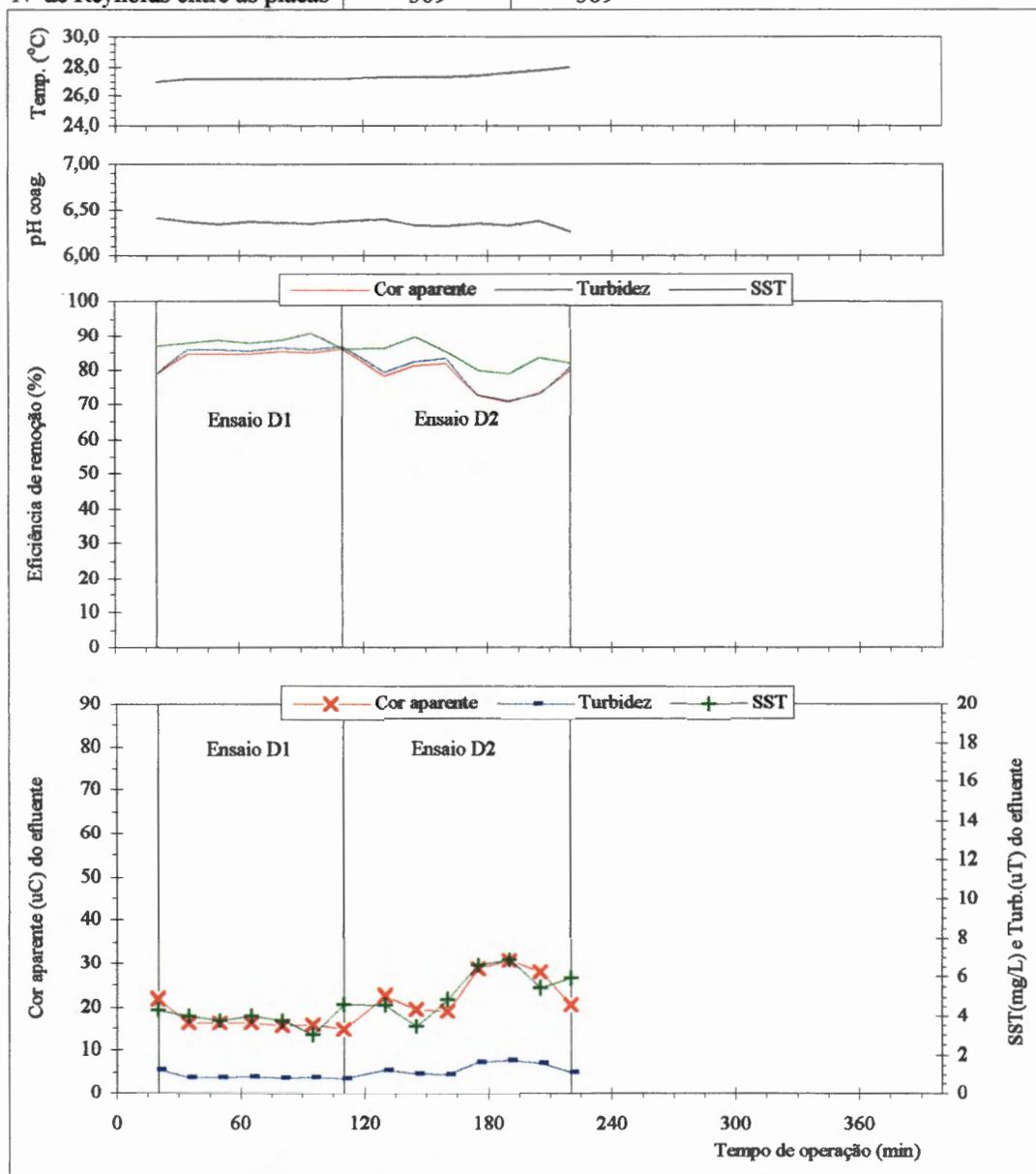


FIGURA 95 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 11 da instalação com escoamento contínuo (ensaios D1 e D2) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 17, apêndice 2b).

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 105 uC	SST: 33 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 64 uC	SSF: 26 mg/L	Sp*p: 3,73 ± 0,05 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 6,03 uT	SSV: 7 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio D3	Ensaio D4
Nº de câmaras de floculação	2	2
Tempo teórico de floc. (min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	60	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	40	80
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Vazão afluyente (L/h)	1158	1158
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	358	358
Veloc. entre as placas (cm/min)	31	31
Nº de Reynolds entre as placas	367	367

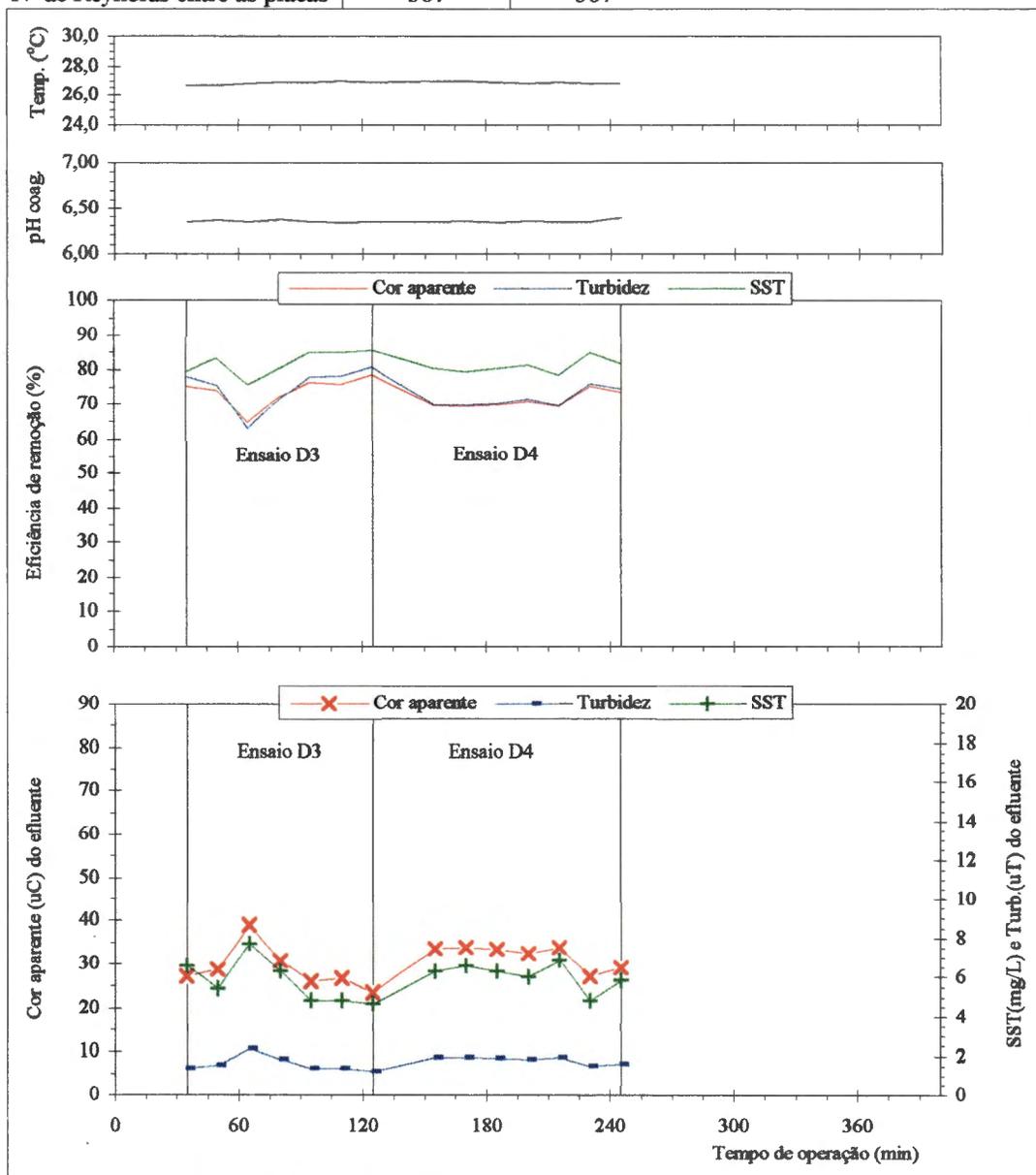


FIGURA 96 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 12 da instalação com escoamento contínuo (ensaios D3 e D4) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 18, apêndice 2b).

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 111 uC	SST: 32 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 66 uC	SSF: 26 mg/L	Sp*p: 3,83 ± 0,04 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 6,43 uT	SSV: 6 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio II
Nº de câmaras de floculação	2
Tempo teórico de floc. (min)	8
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-
Vazão afluyente (L/h)	1721
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	531
Veloc. entre as placas (cm/min)	46
Nº de Reynolds entre as placas	545

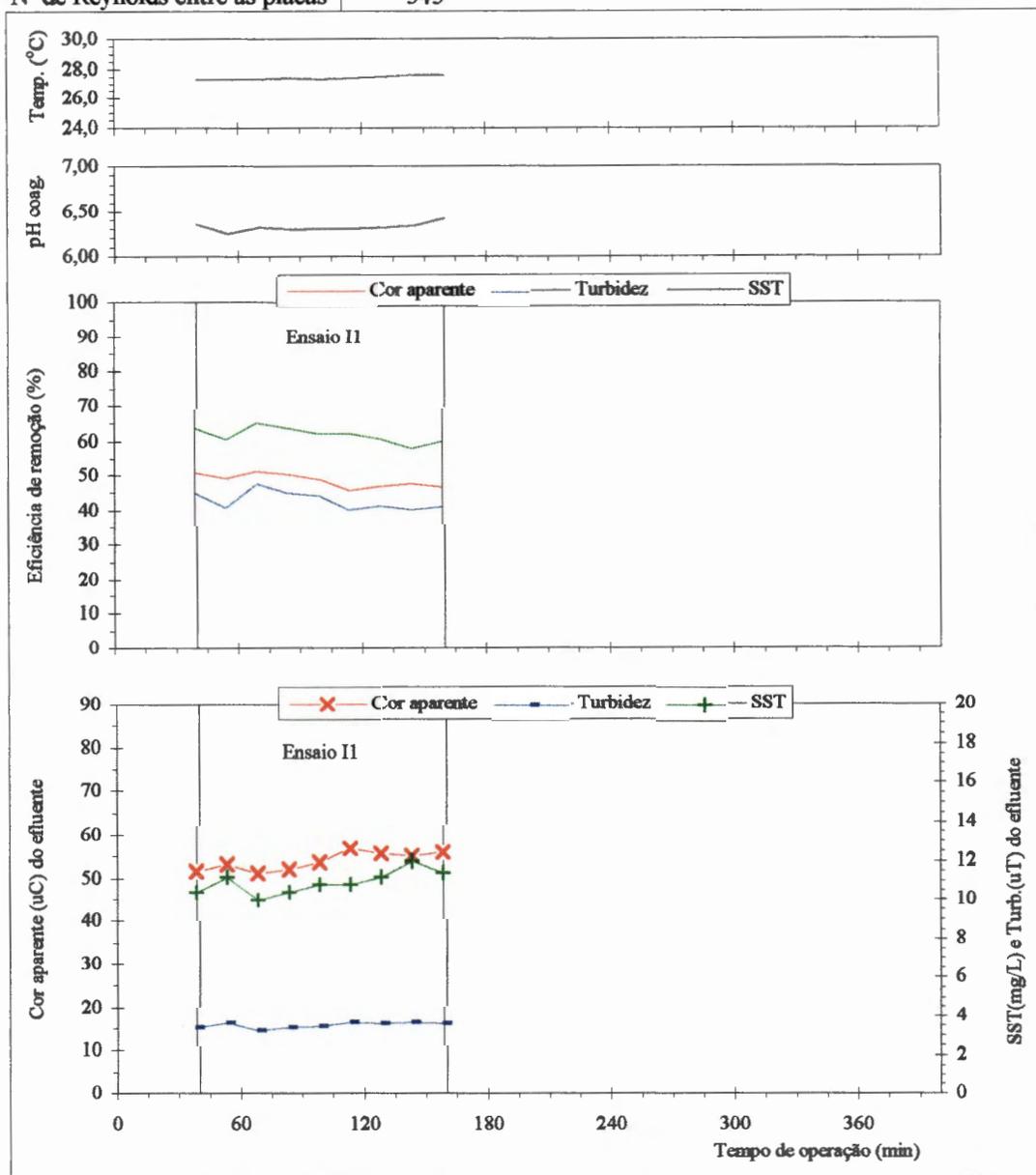


FIGURA 97 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 13 da instalação com escoamento contínuo (ensaio II) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 19, apêndice 2b).

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 105 uC	SST: 28,7 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 62 uC	SSF: 22 mg/L	Sp*p: 3,82 ± 0,03 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 6,2 uT	SSV: 6,7 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio D2	Ensaio D3
Nº de câmaras de floculação	2	2
Tempo teórico de floc. (min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	60
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	60	40
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Vazão afluyente (L/h)	1157	1157
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	358	358
Veloc. entre as placas (cm/min)	31	31
Nº de Reynolds entre as placas	367	367

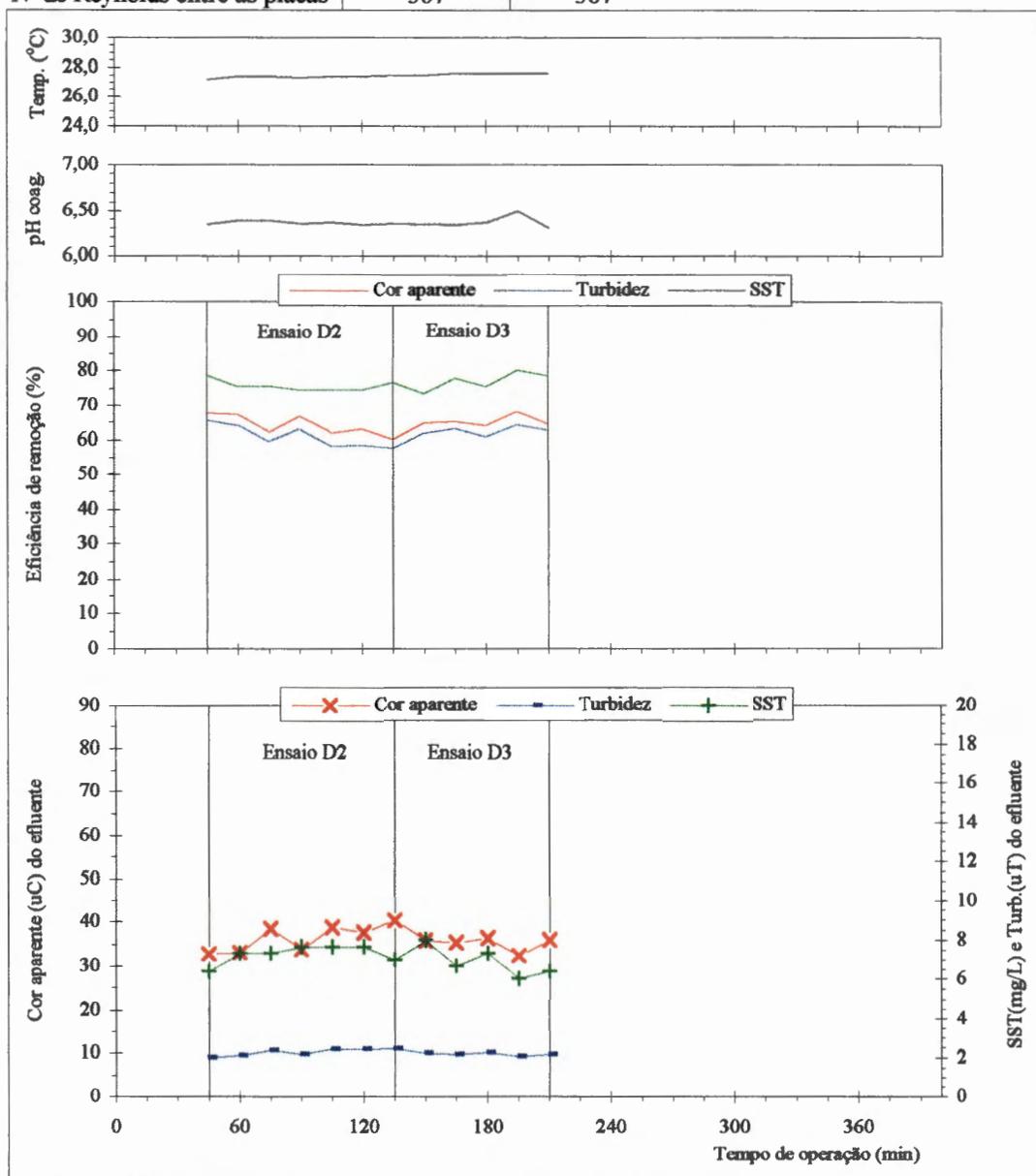


FIGURA 98 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 14 da instalação com escoamento contínuo (ensaios D2 e D3) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 20, apêndice 2b).

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 102 uC	SST: 30,3 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 61 uC	SSF: 23,3 mg/L	Sp*p: 3,78 ± 0,04 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 5,84 uT	SSV: 7 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio L2
Nº de câmaras de floculação	1
Tempo teórico de floc. (min)	4
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-
Vazão afluyente (L/h)	1722
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	531
Veloc. entre as placas (cm/min)	46
Nº de Reynolds entre as placas	545

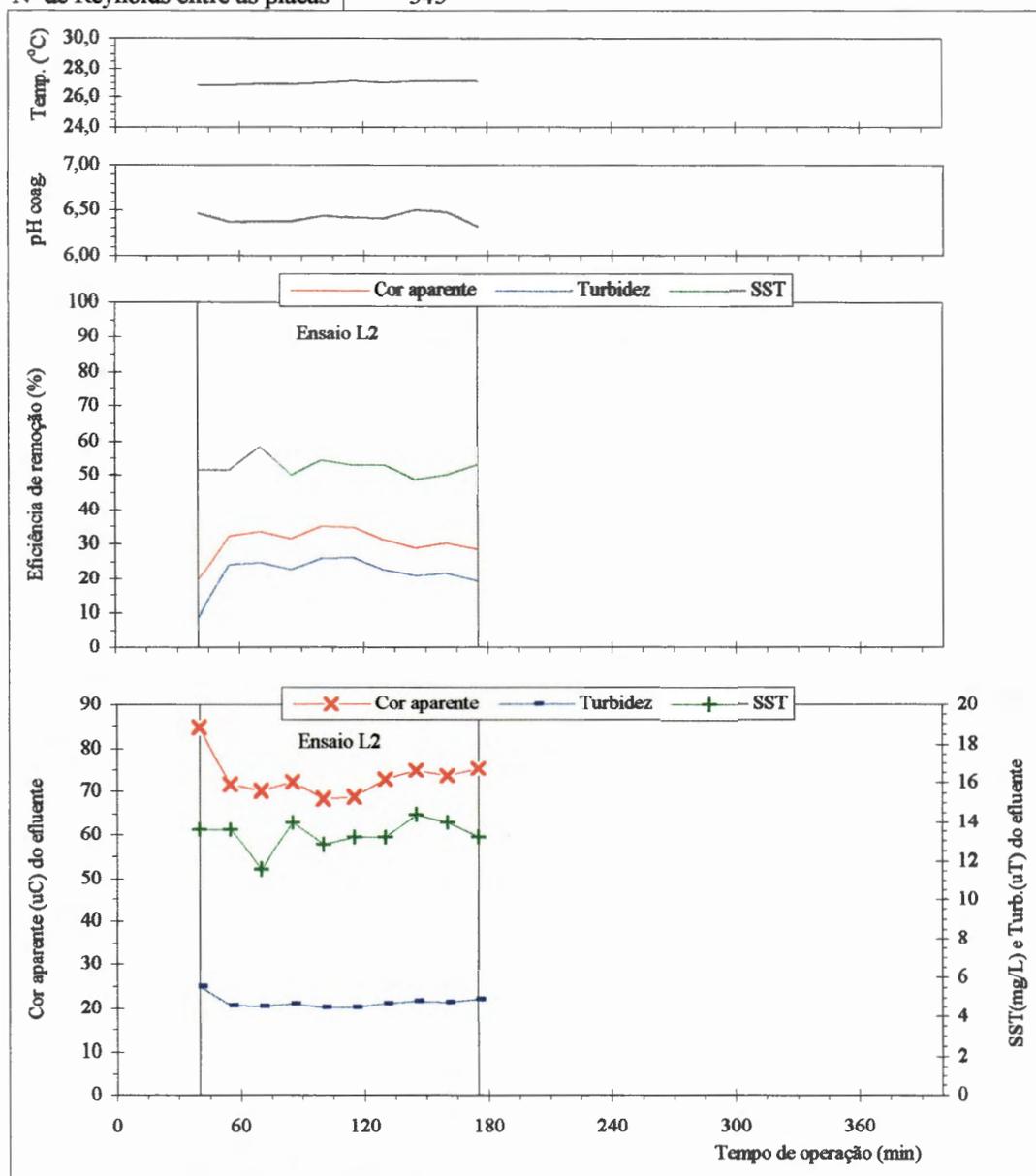


FIGURA 99 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 15 da instalação com escoamento contínuo (ensaio L2) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 21, apêndice 2b).

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 105 uC	SST: 28 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 60 uC	SSF: 19 mg/L	Sp*p: 3,85 ± 0,02 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 6,1 uT	SSV: 9 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio L3
Nº de câmaras de floculação	1
Tempo teórico de floc. (min)	4
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-
Vazão afluyente (L/h)	1720
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	425
Veloc. entre as placas (cm/min)	37
Nº de Reynolds entre as placas	435

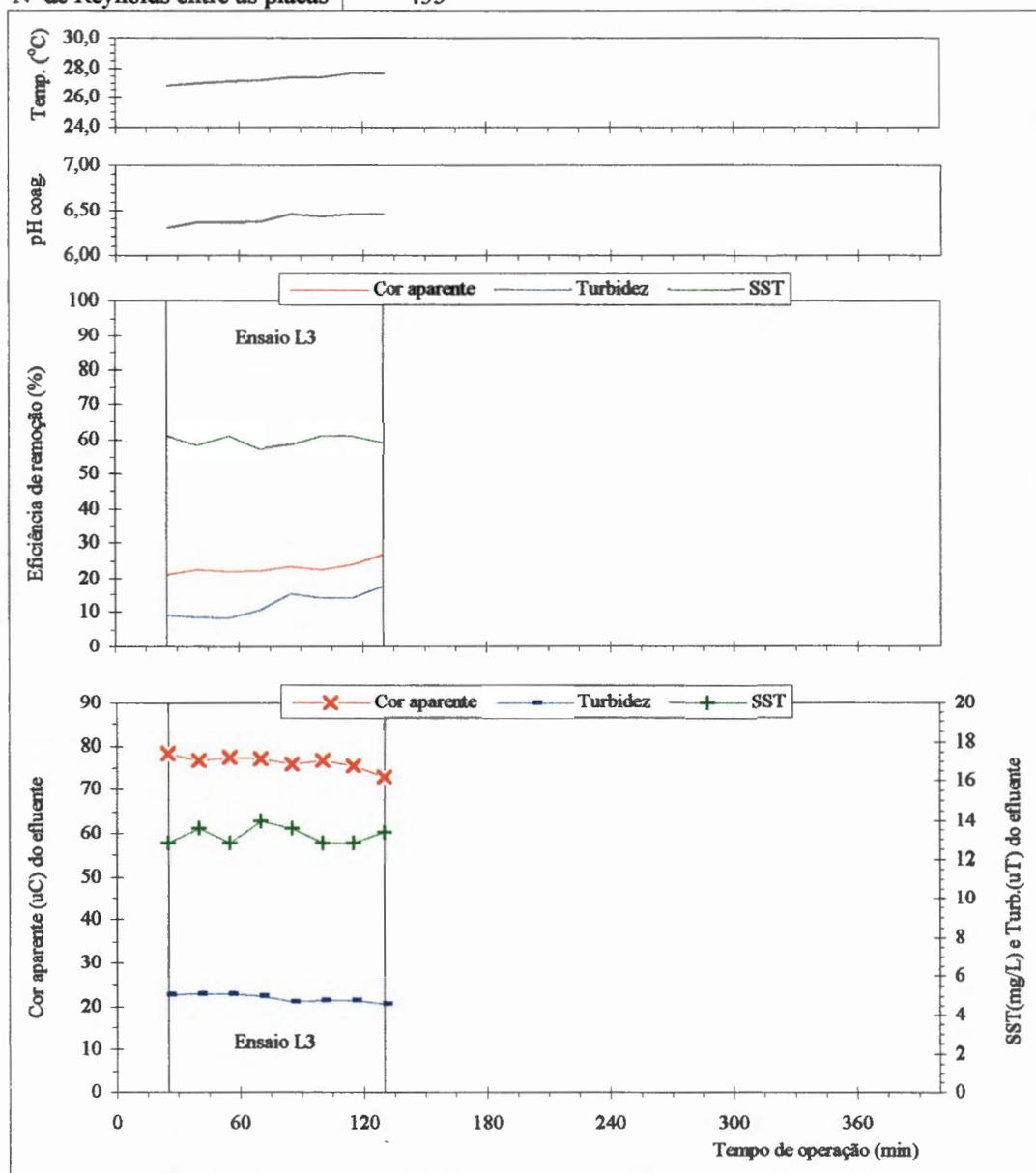


FIGURA 100 Resultados obtidos durante a carreira de operação 16 da instalação com escoamento contínuo (ensaio L3) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 22, apêndice 2b).

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 99 uC	SST: 33 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 60 uC	SSF: 25 mg/L	Sp*p: 3,84 ± 0,06 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 5,59 uT	SSV: 8 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio F1	Ensaio F2
Nº de câmaras de floculação	3	3
Tempo teórico de floc. (min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	120
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	40	100
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	40	80
Vazão afluente (L/h)	1720	1720
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	708	708
Veloc. entre as placas (cm/min)	62	62
Nº de Reynolds entre as placas	726	726

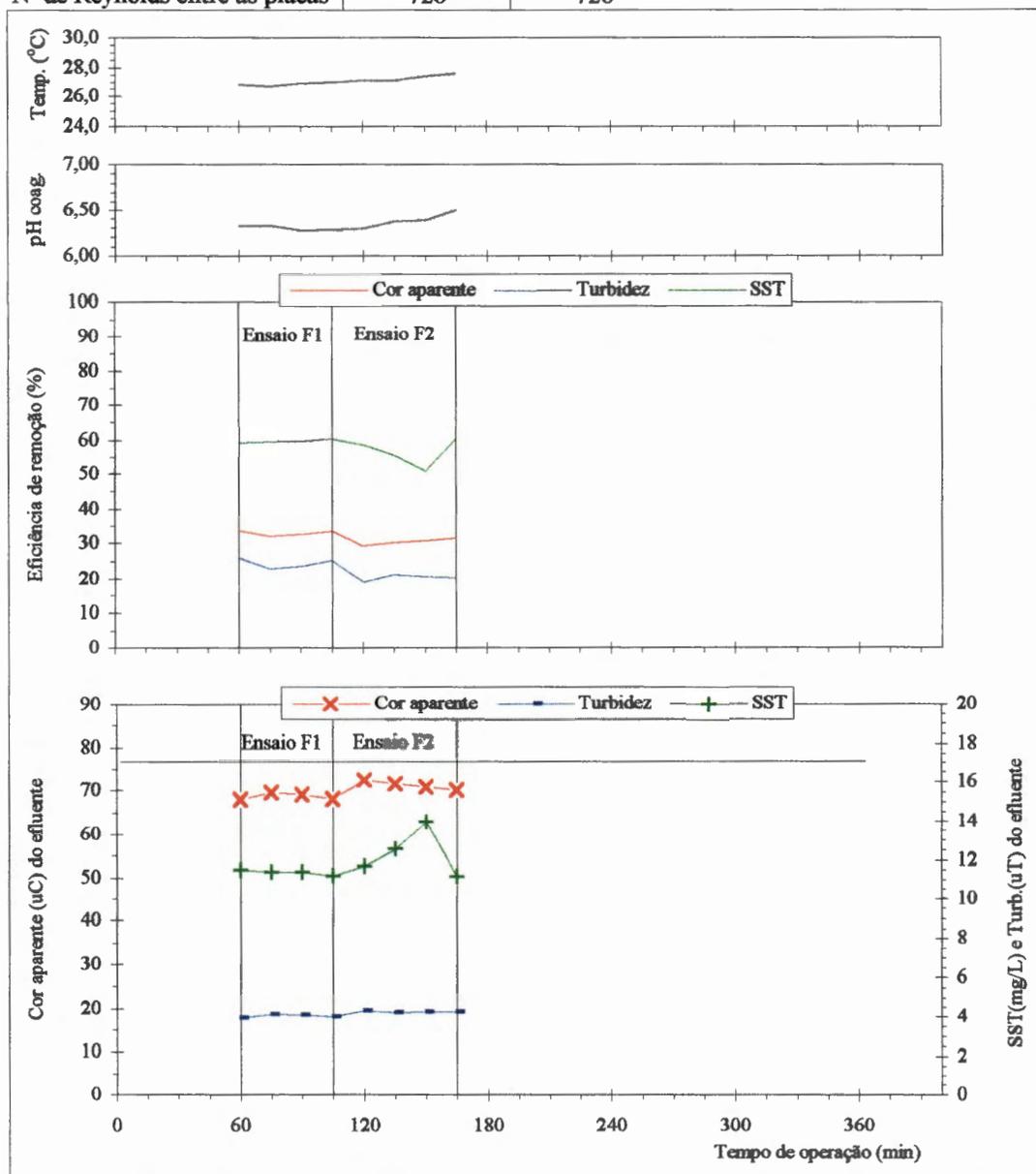


FIGURA 101 Resultados obtidos durante a carreira de operação 17 da instalação com escoamento contínuo (ensaios F1 e F2) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 23, apêndice

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 102 uC	SST: 28,4 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 64 uC	SSF: 23,9 mg/L	Sp*p: 3,85 ± 0,06 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 5,39 uT	SSV: 4,5 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio F1	Ensaio F2
Nº de câmaras de floculação	3	3
Tempo teórico de floc. (min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	120
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	40	100
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	40	80
Vazão afluyente (L/h)	1741	1741
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	716	716
Veloc. entre as placas (cm/min)	62	62
Nº de Reynolds entre as placas	734	734

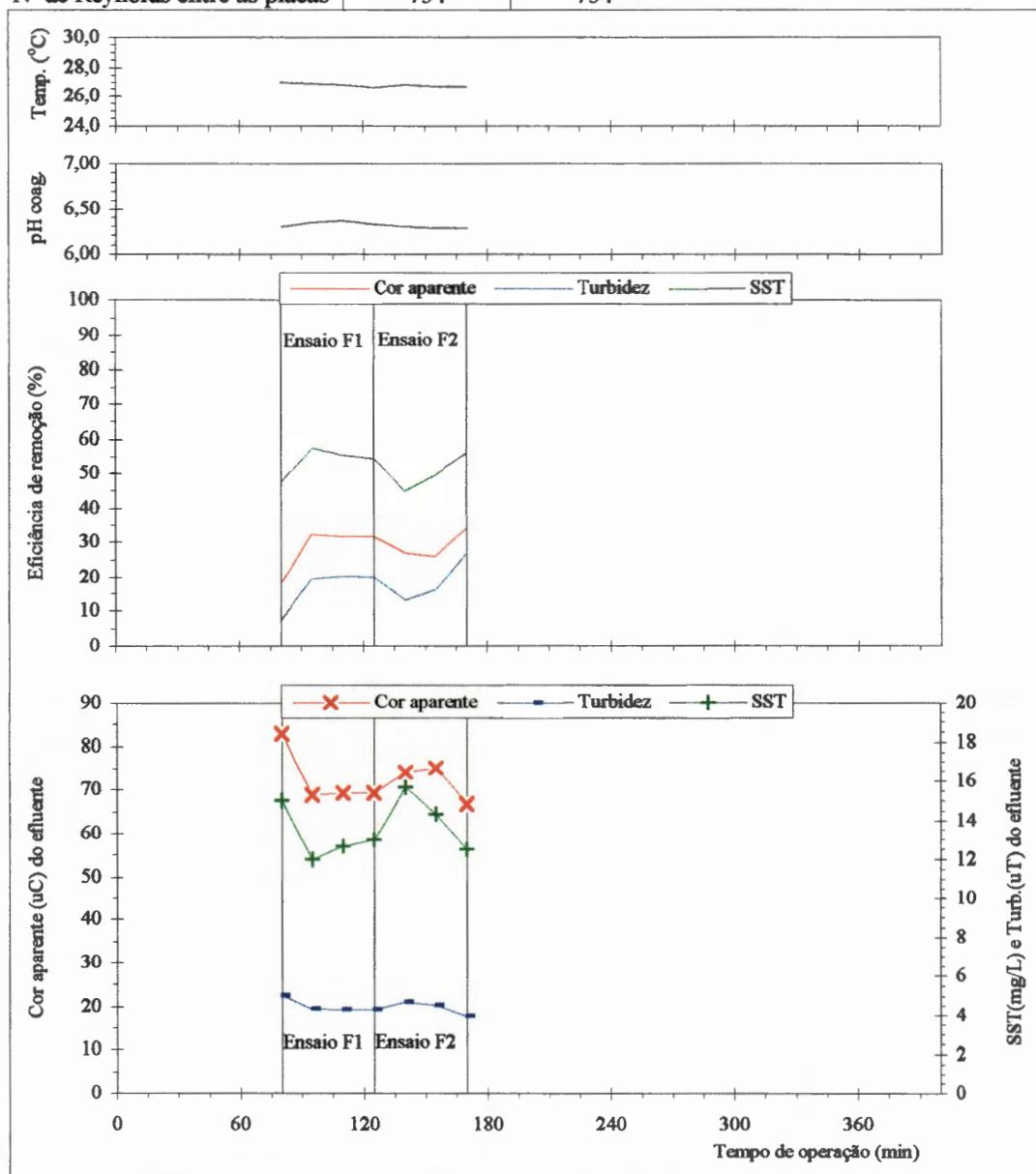


FIGURA 102 Resultados obtidos durante a carreira de operação 18 da instalação com escoamento contínuo (ensaios F1 e F2) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 24, apêndice

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 101 uC	SST: 28,5 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 65 uC	SSF: 22,5 mg/L	Sp*p: 3,85 ± 0,05 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 5,43 uT	SSV: 6 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio G3	Ensaio G4	Ensaio G5
Nº de câmaras de floculação	2	2	2
Tempo teórico de floc. (min)	12	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	100	60	120
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	40	100
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-	-
Vazão afluyente (L/h)	1160	1160	1160
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	717	717	717
Veloc. entre as placas (cm/min)	63	63	63
Nº de Reynolds entre as placas	735	735	735

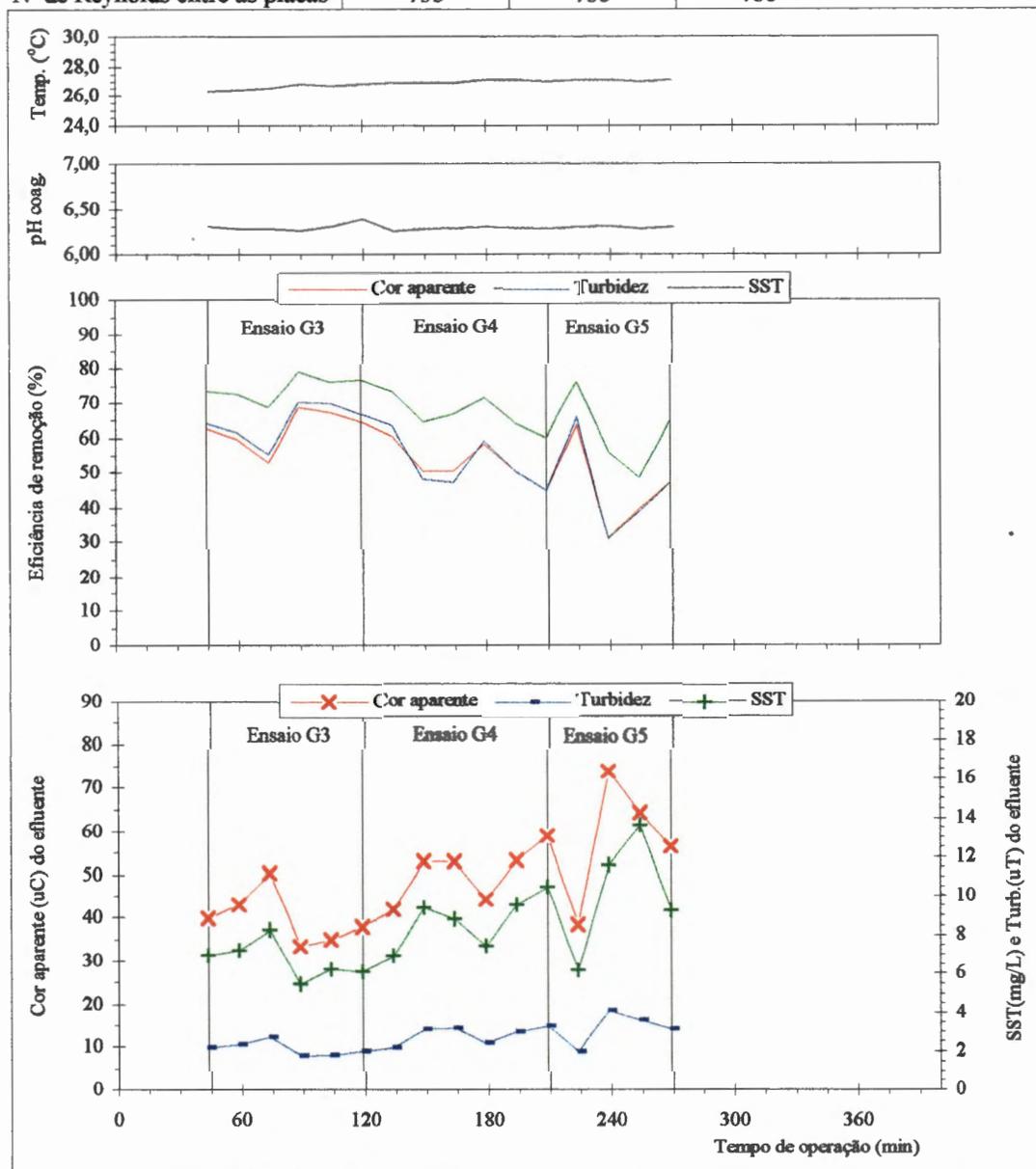


FIGURA 103 Resultados obtidos durante a carreira de operação 19 da instalação com escoamento contínuo (ensaios G3, G4 e G5) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 25, apêndice

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 108 uC	SST: 26,7 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 65 uC	SSF: 19,7 mg/L	Sp*p: 3,83 ± 0,06 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 6,14 uT	SSV: 7 mg/L	

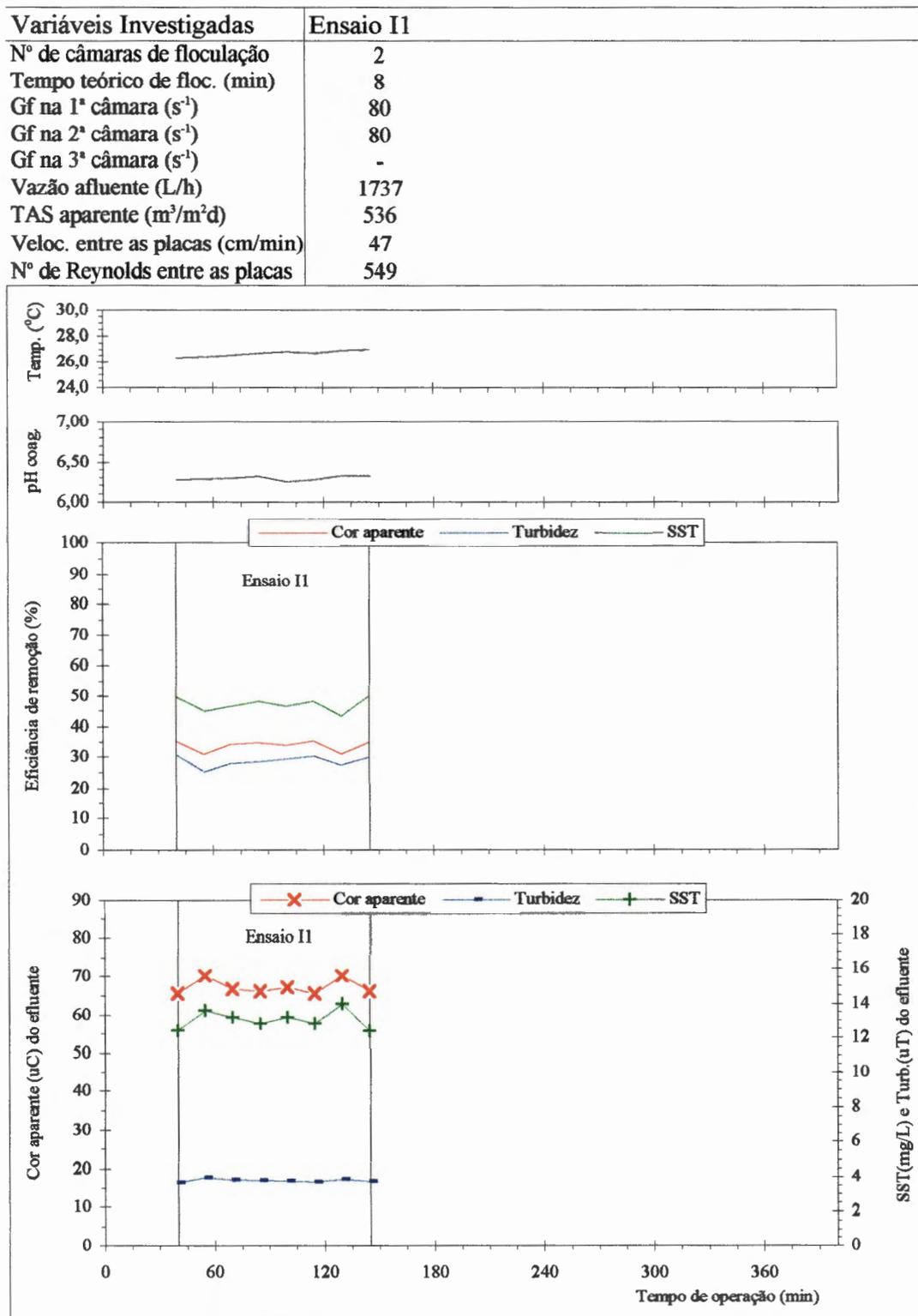


FIGURA 104 Resultados obtidos durante a carreira de operação 20 da instalação com escoamento contínuo (ensaio I1) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 26, apêndice 2b).

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 101 uC	SST: 24,7 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 62 uC	SSF: 18 mg/L	Sp*p: 3,85 ± 0,01 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 5,33 uT	SSV: 6,7 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio D5	Ensaio D1	Ensaio D6
Nº de câmaras de floculação	2	2	2
Tempo teórico de floc. (min)	12	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	120	100	140
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	100	80	120
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-	-
Vazão afluyente (L/h)	1167	1167	1167
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	361	361	361
Veloc. entre as placas (cm/min)	31	31	31
Nº de Reynolds entre as placas	370	370	370

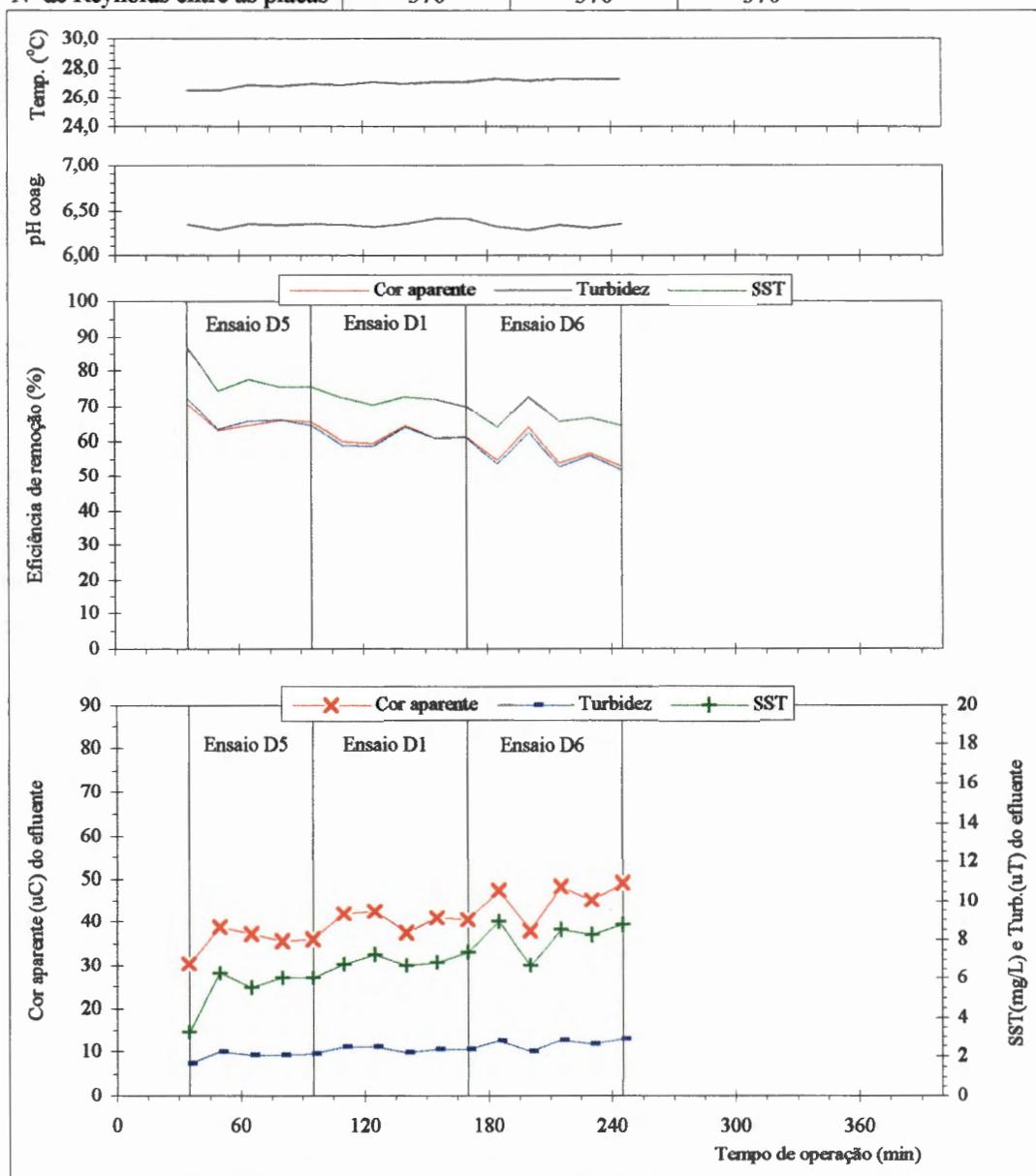


FIGURA 105 Resultados obtidos durante a carreira de operação 21 da instalação com escoamento contínuo (ensaios D5, D1 e D6) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 27, apêndice

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 105 uC	SST: 24,7 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 61 uC	SSF: 17,8 mg/L	Sp*p: 3,79 ± 0,09 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 5,95 uT	SSV: 6,9 mg/L	

Variáveis Investigadas	Ensaio D1	Ensaio D5
Nº de câmaras de floculação	2	2
Tempo teórico de floc. (min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	100	120
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	100
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Vazão afluente (L/h)	1157	1157
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	358	358
Veloc. entre as placas (cm/min)	31	31
Nº de Reynolds entre as placas	367	367

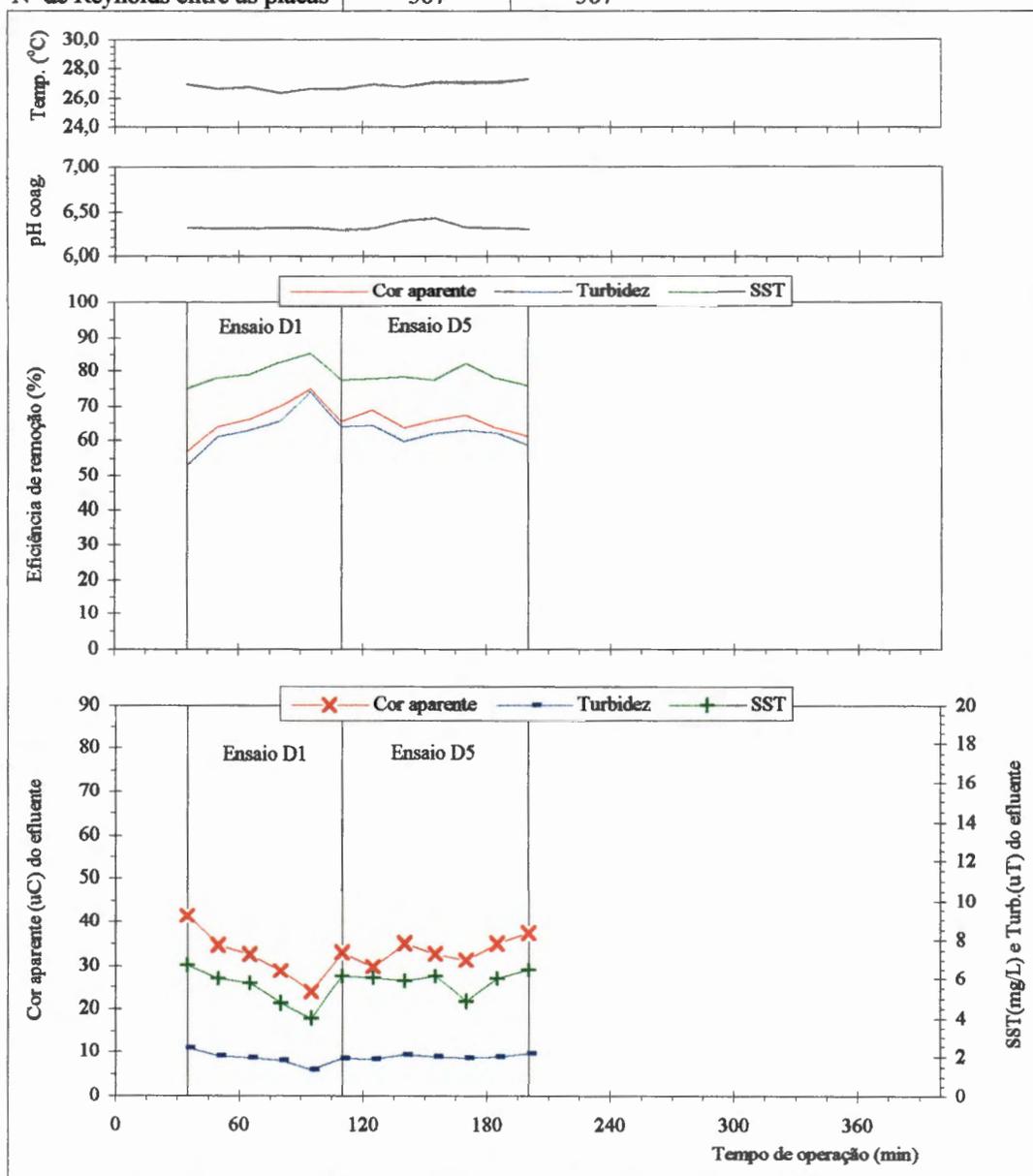


FIGURA 106 Resultados obtidos durante a carreira de operação 22 da instalação com escoamento contínuo (ensaios D1 e D5) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, utilizando-se a água tipo I (Fonte: tabela 28, apêndice

Características da água de estudo	Características da água floculada	Parâmetros operacionais mantidos constantes
Cor apar.: 96 uC	SST: 27,3 mg/L	DSA: 40 mg/L
Cor verd.: 58 uC	SSF: 21,9 mg/L	Sp*p: 3,8 ± 0,07 g de ar/m <sup>3</sup> de água
Turbidez: 5,17 uT	SSV: 5,4 mg/L	

#### **5.4 Analogia entre os resultados obtidos no flotateste com os resultados obtidos na instalação com escoamento contínuo para a água tipo I**

No quadro 10, a seguir, são apresentados alguns resultados obtidos nos ensaios realizados utilizando-se o equipamento de flotateste, onde foram estudadas diferentes combinações do gradiente de velocidade médio de floculação (item 5.2.5) junto com alguns resultados obtidos em ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo (item 5.3), utilizando-se a água tipo I. Os resultados obtidos com ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo, apresentados no quadro 10, referem-se aos melhores resultados obtidos em cada ensaio considerado (ver quadro 9), levando em conta todas as discussões mencionadas no item anterior (item 5.3).

Os resultados apresentados no quadro 10 referem-se aos ensaios em que foram utilizados os mesmos escalonamentos do gradiente de velocidade médio de floculação, tanto na instalação com escoamento contínuo, quanto com o equipamento de flotateste, para os valores mais próximos da velocidade de flotação.

Embora certas condições dos ensaios realizados com a instalação com escoamento contínuo e com o flotateste, tenham sido diferentes, por exemplo temperatura da água de estudo (ver observações no rodapé do quadro 10), ou analogia entre velocidade de flotação utilizada no flotateste com TAS utilizada na câmara de flotação da instalação com escoamento contínuo; acredita-se que é importante verificar a correspondência entre os resultados obtidos em ambas instalações.

Observando-se o quadro 10, verifica-se que para o tempo de floculação de 12 min, todos os resultados obtidos nos ensaios realizados com o equipamento de flotateste, com exceção da remoção de turbidez do ensaio com escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação de  $100-80 \text{ s}^{-1}$ , mostraram melhor desempenho da flotação do que os resultados obtidos utilizando-se a instalação com

QUADRO 10 - Resultados obtidos utilizando-se o equipamento de flotateste para  $V_f = 21$  cm/min ( $\cong 302$  m/d), e resultados obtidos em ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo, com TAS aparente na câmara de flotação  $\cong 360$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia ( $V_{\text{placas}} \cong 31$  cm/min  $\cong 446$  m/d), com a água tipo I

Tempo de floculação (min)	Escalonamento Gf (s <sup>-1</sup> )	Eficiência de remoção de cor aparente (%)		Eficiência de remoção de turbidez (%)	
		Instalação com escoamento contínuo* <sup>+</sup>	Flotateste **	Instalação com escoamento contínuo* <sup>+</sup>	Flotateste **
24	120-100-80	88,1	84,7	87,0	77,6
24	80-60-60	90,5	84,4	90,5	81,2
24	60-60-60	91,1	86,8	90,0	83,2
24	60-40-20	88,7	67,2	88,7	65,0
24	100-80	90,2	80,1	87,9	76,3
24	80-60	92,0	89,8	90,4	87,0
24	60-40	92,0	77,2	90,0	72,8
12	100-80	75,3	76,1	74,3	72,3
12	80-80	75,5	80,7	76,2	78,7
12	80-60	67,6	85,5	65,6	82,3
12	60-40	68,1	79,3	64,4	78,5

\* Condições dos ensaios realizados com a instalação com escoamento contínuo: DSA= 40 mg/L, pH de coagulação=  $6,37 \pm 0,15$ , temperatura da água de estudo=  $27,4 \pm 1,1^\circ\text{C}$ ,  $Sp^*p = 3,88 \pm 0,28$  g de ar/m<sup>3</sup> de água (pressão na câmara de saturação=  $441 \pm 5$  kPa e razão de recirculação  $\cong 5\%$  em relação à vazão afluyente da água de estudo).

\*\* Condições dos ensaios realizados com o equipamento de flotateste: DSA= 40 mg/L, pH de coagulação=  $6,37 \pm 0,10$ , temperatura da água de estudo=  $25,2 \pm 0,8^\circ\text{C}$ , pressão na câmara de saturação= 441 kPa, fração de recirculação= 8% (em volume).

+ Os resultados obtidos com a instalação com escoamento contínuo para escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação com 1, 2 ou 3 valores de gradientes, significa que os ensaios foram realizados com 1, 2 ou 3 câmaras de floculação em série, respectivamente.

escoamento contínuo. Entretanto, conforme mencionado no item 5.3, observou-se que a vazão afluyente à instalação com escoamento contínuo utilizada nos ensaios realizados para tempo de 12 min, ou seja, o tempo de passagem na região de contato bolhas-partículas, influenciou no desempenho da flotação, ficando prejudicada possíveis conclusões sobre a relação entre os resultados obtidos em ambas instalações. Por outro lado, para os ensaios realizados na instalação com tempo de

floculação de 24 min, observou-se que não houve influência da vazão afluyente no desempenho da flotação.

A partir do quadro 10, verifica-se que foram obtidos melhores resultados de eficiência de remoção de cor aparente e turbidez em todos os ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo, com tempo de floculação de 24 min e com duas e três câmaras de floculação em série, do que os resultados obtidos nos ensaios realizados com o equipamento de flotateste para o tempo de 24 min, utilizando-se os mesmos escalonamentos do gradiente de velocidade de floculação. Porém, é importante mencionar a diferença significativa (em torno de 2°C) entre os valores de temperatura da água de estudo dos ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo e no flotateste, o que pode ser limitante para uma comparação mais rigorosa entre os resultados obtidos. Por outro lado, a velocidade de flotação utilizada para coleta das amostras no flotateste (21 cm/min  $\cong$  302 m/d) não é equivalente à velocidade de flotação no interior da unidade piloto com escoamento contínuo entre placas, não sendo possível fazer qualquer comparação mais rigorosa em relação à eficiência de flotação nos dois sistemas.

Ainda com relação aos ensaios realizados com tempo de floculação de 24 min, verifica-se que o desempenho da flotação para o escalonamento do gradiente de velocidade médio de 60-40-20 s<sup>-1</sup> foi bastante inferior no flotateste (remoção de cor aparente de 67,2%) do que o desempenho obtido na instalação com escoamento contínuo (remoção de cor de 88,7%).

Para o tempo de floculação de 24 min, observa-se que o escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação que apresentou melhor desempenho da flotação na instalação com escoamento contínuo (80-60 s<sup>-1</sup>) foi o mesmo para o qual obteve-se melhor desempenho no flotateste (ver quadro 10).

Assim, observa-se que para o tempo de 24 min, os resultados alcançados a partir de ensaios realizados com o equipamento de flotateste, representaram de maneira bastante razoável os resultados qualitativos obtidos na instalação com escoamento contínuo com escoamento contínuo, demonstrando que o equipamento

de flotatestes pode ser empregado para adequações dos parâmetros de floculação visando a flotação.

### **5.5 Resultados dos ensaios realizados com o reator estático de floculação-flotação por ar dissolvido (flotatestes) e a água tipo II**

Para a água tipo II tentou-se otimizar, de maneira relativamente rápida, algumas condições de ensaio para obter desempenho razoável de clarificação por flotação da água em questão, além de comparar o desempenho da sedimentação para as mesmas condições de coagulação e floculação. Os parâmetros otimizados foram a dosagem de sulfato de alumínio, pH de coagulação e quantidade de ar fornecida para a flotação ( $Sp \cdot p$ ). No Apêndice 3 são apresentadas as tabelas que originaram as figuras mostradas neste item.

As figuras 107 a 120, a seguir, apresentam valores de cor aparente e turbidez remanescentes em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio de 20, 25, 30, 40, 50, 60 e 70 mg/L, obtidos para clarificação por flotação e por sedimentação. Nos ensaios em que a clarificação foi obtida por flotação, as amostras foram coletadas com velocidade de flotação ( $V_f$ ) de 16,25 cm/min (234 m/d). Para a clarificação por sedimentação, as amostras foram coletadas com velocidade de sedimentação ( $V_s$ ) de 1,5 cm/min ( $\cong$  22 m/d). Os demais parâmetros operacionais utilizados durante a execução desses ensaios foram mantidos constantes e iguais a:  $T_{mr} = 20$  s,  $G_{mr} = 800$  s<sup>-1</sup>,  $T_f = 15$  min,  $G_f = 31$  s<sup>-1</sup>,  $P = 441$  kPa e  $R = 8\%$  (em volume), considerando os dois últimos parâmetros para os ensaios de flotação.

Observando-se as figuras 107 a 120, verifica-se que a clarificação por flotação apresentou maior eficiência de remoção de cor aparente e turbidez do que a clarificação por sedimentação, para todas as dosagens de sulfato de alumínio e faixa de pH de coagulação estudadas.

Um resumo dos resultados mostrados nas figuras 107 a 120 é apresentado no quadro 11, a seguir. O quadro 11 mostra os valores de pH ótimo para cada dosagem de sulfato de alumínio com os respectivos valores de eficiência de remoção de cor

aparente e de turbidez, para ambos métodos de clarificação (flotação e sedimentação). Devido à água de estudo apresentar cor aparente elevada em relação à turbidez, será dado maior ênfase para a remoção de cor, conforme considerado também para a água tipo I.

De acordo com os resultados apresentados no quadro 11, verifica-se que o pH ótimo obtido nos ensaios empregando a clarificação por flotação, coincidiu com o pH ótimo obtido nos ensaios empregando a clarificação por sedimentação, somente para três valores de DSA (20, 30 e 50 mg/L). Tais resultados comprovam a importância de ensaios realizados em equipamento de flotatete para determinar dosagem de coagulante e pH ótimos quando é pretendida a clarificação por flotação.

QUADRO 11 - Condições ótimas de coagulação e respectivos valores de eficiência de remoção (%) de cor aparente e turbidez obtidos para clarificação por flotação e sedimentação da água tipo II

DSA (mg/L)	Clarificação por flotação Vf= 16,25 cm/min (234 m/d)			Clarificação por sedimentação Vs= 1,5 cm/min (≅ 22m/d)			Referente às figuras números
	pH	Eficiência de remoção (%)		pH	Eficiência de remoção (%)		
		Cor apar.	Turbidez		Cor apar.	Turbidez	
20	6,06	89,0	80,3	6,05	16,1	-	107 e 108
25	6,16	91,0	84,2	6,37	51,7	15,3	109 e 110
30	6,31	90,8	85,4	6,31	48,7	15,7	111 e 112
40	6,39	91,3	86,8	6,64	52,8	23,9	113 e 114
50	6,45	91,3	88,6	6,43	60,0	40,0	115 e 116
60	6,59	93,2	87,0	6,39	36,3	-	117 e 118
70	6,28	94,1	87,7	6,73	40,3	3,0	119 e 120

Nos ensaios empregando-se clarificação por flotação, verifica-se que foi obtida eficiência de remoção de cor aparente e turbidez acima de 80% para todos os valores de DSA estudados com seus respectivos valores de pH ótimo (figuras 107 a 120 e quadro 11). Em todos os ensaios, exceto para DSA= 70 mg/L e pH de coagulação= 6,06, a percentagem de remoção de cor aparente foi superior, comparando-se com a percentagem de remoção de turbidez. No entanto, é importante mencionar que,

embora as melhores remoções de turbidez tenham ficado entre 80 a 88%, considerando as condições ótimas de coagulação, os valores correspondentes de turbidez remanescente foram inferiores a 1 uT (0,53 a 0,92 uT).

Ainda com relação à clarificação por flotação, a partir do quadro 11 verifica-se que: para todos os valores de DSA estudadas, exceto para DSA= 20 mg/L, obteve-se remoção de cor aparente igual ou superior a 90,8%; a maior eficiência de remoção de cor aparente (94,1%) foi obtida para DSA= 70 mg/L com pH de coagulação de 6,28; para os valores de DSA de 25, 30, 40 e 50 mg/L, obteve-se valores equivalentes de eficiência de remoção de cor aparente (90,8 a 91,3%). A última constatação é de grande importância, já que, para o caso de projeto em escala real, quanto menor a dosagem de coagulante a ser utilizada, menor o gasto mensal com produtos químicos e menor a produção de lodo. No entanto, apesar da DSA de 25 mg/L com pH de coagulação de 6,16, ter apresentado boa remoção de cor aparente (91,0%), nota-se que a obtenção do pH ótimo requereu o uso de solução de ácido (tabela 29, apêndice 3). Assim, pode-se admitir que a maior eficiência de remoção de cor aparente (94,1%) obtida (DSA de 70 mg/L com pH de coagulação de 6,28), seja relativamente comparável à eficiência de remoção de cor aparente apresentada pela DSA de 30 mg/L com pH de coagulação de 6,31 (90,8%), cujo pH ótimo foi obtido com dosagem relativamente baixa de barrilha (2,5 mg/L - tabela 29, apêndice3).

Na figura 121 são apresentados valores de cor aparente remanescente na forma de curvas de flotação, para DSA de 25, 30, 50 e 70 mg/L com seus respectivos valores de pH ótimo de coagulação e, de curvas de sedimentação, para DSA de 25, 30 e 50 mg/L com respectivos valores de pH ótimo de coagulação. Tais valores de DSA foram selecionados para obtenção de curvas de flotação e curvas de sedimentação levando-se em consideração o consumo de sulfato de alumínio, pH ótimo de coagulação e eficiência de remoção de cor aparente e de turbidez. Para a obtenção das curvas de flotação, as amostras foram coletadas para valores de velocidade de flotação entre 4 e 50 cm/min (aproximadamente, 58 e 720 m/d). Para o caso da clarificação por sedimentação, as amostras foram coletadas para valores de velocidade de sedimentação de 0,3 a 10,9 cm/min (aproximadamente, 4 a 157 m/d).

Observando-se as curvas apresentadas na figura 121 verifica-se: (i) comparando-se as curvas de sedimentação para os três valores de DSA (25, 30 e 50 mg/L), observa-se maior remoção de cor aparente para DSA de 50 mg/L, para todos os valores de velocidade de sedimentação; (ii) a maior eficiência de remoção de cor aparente obtida por sedimentação (DSA= 50 mg/L) foi de 74,2% para  $V_s$  de 0,3 cm/min; (iii) as curvas de flotação, para os quatro valores de DSA (25, 30, 50 e 70 mg/L), apresentaram eficiência de remoção de cor aparente superior (86,1 a 91,7%) à maior remoção obtida por sedimentação (74,2%) para  $V_s$ = 0,3 cm/min, para velocidade de flotação até 20 cm/min; (iv) a remoção de cor aparente por flotação manteve-se relativamente constante para velocidade de flotação até 15 cm/min, tendo apresentado eficiência de remoção (para  $V_f$  até 15 cm/min) de: 88,3 a 89,9% para DSA= 25 mg/L; 88,4 a 90,7% para DSA= 30 mg/L; 92,0 a 93,0% para DSA= 50 mg/L e 93,1 a 94,5 para DSA= 70 mg/L; (v) a curva de flotação para DSA= 70mg/L apresentou melhor remoção de cor aparente em todas as velocidades de flotação; (vi) a eficiência de remoção de cor aparente por flotação foi praticamente equivalente para DSA de 25 e 30 mg/L, para velocidade de flotação até 15 cm/min, porém, para velocidade de flotação acima de, aproximadamente, 27 cm/min, a DSA de 30 mg/L apresentou melhor remoção de cor aparente; (vii) considerando o consumo de sulfato de alumínio, acredita-se que a eficiência de remoção de cor aparente apresentada para DSA de 30 mg/L seja comparável com a eficiência de remoção apresentada para DSA de 70 mg/L, conforme já comentado.

A partir dos resultados apresentados nas figuras 107 a 121 e quadro 11, verifica-se que para as condições utilizadas de coagulação (tipo e dosagem de coagulante e pH de coagulação), a sedimentação não produziu desempenho satisfatório para a clarificação da água em estudo. Observa-se que a maior eficiência de remoção de cor aparente obtida nos ensaios em que a sedimentação foi utilizada para clarificação (DSA= 50 mg/L e pH de coagulação= 6,43), não chegou a 80%. Com relação à turbidez, observa-se que a maior eficiência de remoção obtida foi de 40,0%, também para DSA= 50 mg/L e pH de coagulação= 6,43.

Então, para as condições investigadas de coagulação, verifica-se o melhor desempenho da flotação para clarificação da água estudada comparando-se com a

sedimentação. Dessa forma, outros ensaios foram realizados para otimizar a quantidade de ar fornecida, através da variação da fração de recirculação, para valores de DSA de 30 e 70 mg/L, considerando os ótimos resultados obtidos com tais valores de DSA. Nas figuras 122 e 123 são apresentadas curvas de flotação com valores de cor aparente remanescente para DSA de 30 e 70 mg/L, respectivamente, utilizando-se frações de recirculação de 5, 8, 11 e 14% (em volume).

Observando-se a figura 122, verifica-se que para DSA de 30 mg/L obteve-se melhores resultados de remoção de cor aparente para fração de recirculação de 14%, sendo tais resultados, praticamente equivalentes aos resultados obtidos para fração de recirculação de 11%. No entanto, 8% de recirculação forneceu resultados bastante próximos àqueles referentes a 11 e 14%, considerando principalmente os dois valores mais altos de velocidade de flotação.

Para a DSA de 70 mg/L (figura 123), observa-se que os melhores resultados de remoção de cor aparente são apresentados para valores de fração de recirculação de 8% e 14%, sendo tais resultados (apresentados por ambas frações de recirculação) bastante similares. Assim, com base nos resultados apresentados nas figuras 122 e 123, é possível assumir a fração de recirculação de 8% (pressão na câmara de saturação de 441 kPa) como adequada para permitir bom desempenho da flotação, para a água estudada e DSA de 30 e 70 mg/L.

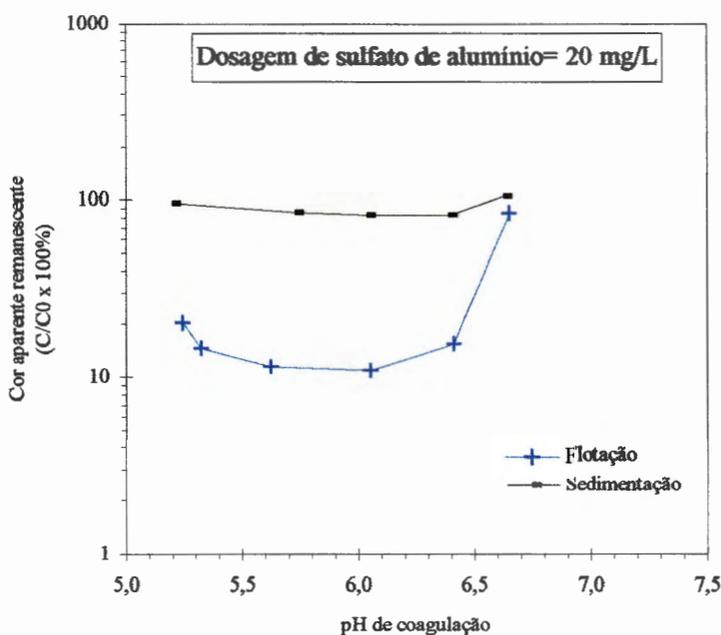


FIGURA 107 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 20 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo II. Ensaio de coagulação-floculação-flotação: velocidade de flotação= 16,25 cm/min; fração de recirculação= 8% (em volume); pressão de saturação= 441 kPa. Ensaio de coagulação-floculação-sedimentação: velocidade de sedimentação= 1,5 cm/min. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT; temperatura:  $21,7 \pm 1,5$  °C (Fonte: tabela 29, apêndice 3).

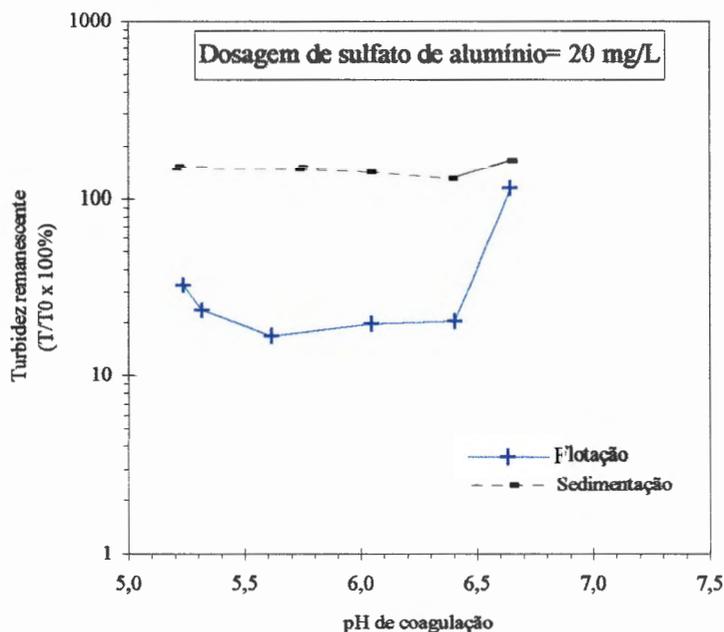


FIGURA 108 - Turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 20 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo II. Ensaio de coagulação-floculação-flotação: velocidade de flotação= 16,25 cm/min; fração de recirculação= 8% (em volume); pressão de saturação= 441 kPa. Ensaio de coagulação-floculação-sedimentação: velocidade de sedimentação= 1,5 cm/min. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT; temperatura:  $21,7 \pm 1,5$  °C (Fonte: tabela 29, apêndice 3).

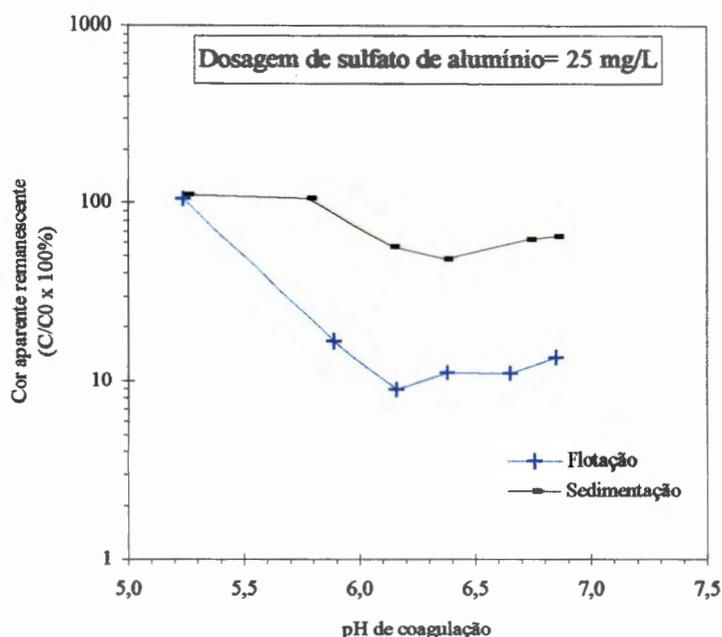


FIGURA 109 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 25 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo II. Ensaio de coagulação-floculação-flotação: velocidade de flotação= 16,25 cm/min; fração de recirculação= 8% (em volume); pressão de saturação= 441 kPa. Ensaio de coagulação-floculação-sedimentação: velocidade de sedimentação= 1,5 cm/min. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT; temperatura:  $21,7 \pm 1,5$  °C (Fonte: tabela 29, apêndice 3).

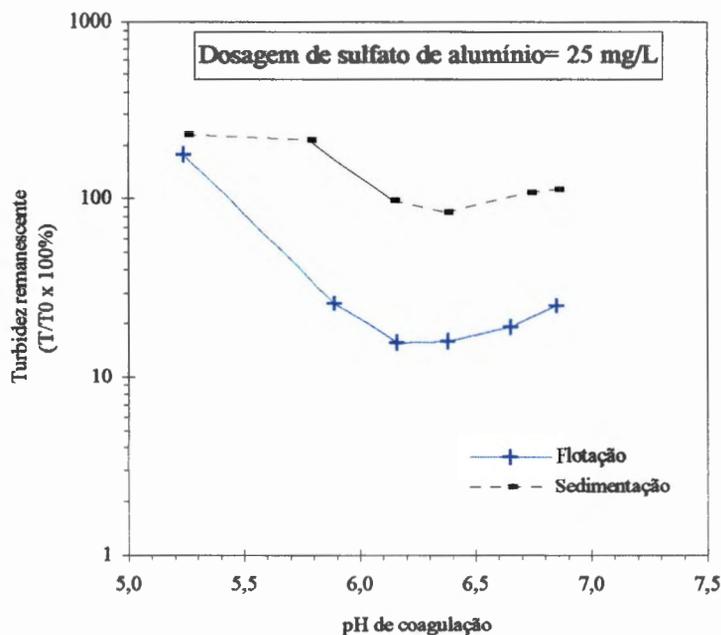


FIGURA 110 - Turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 25 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotatestes e água tipo II. Ensaio de coagulação-floculação-flotação: velocidade de flotação= 16,25 cm/min; fração de recirculação= 8% (em volume); pressão de saturação= 441 kPa. Ensaio de coagulação-floculação-sedimentação: velocidade de sedimentação= 1,5 cm/min. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT; temperatura:  $21,7 \pm 1,5$  °C (Fonte: tabela 29, apêndice 3).

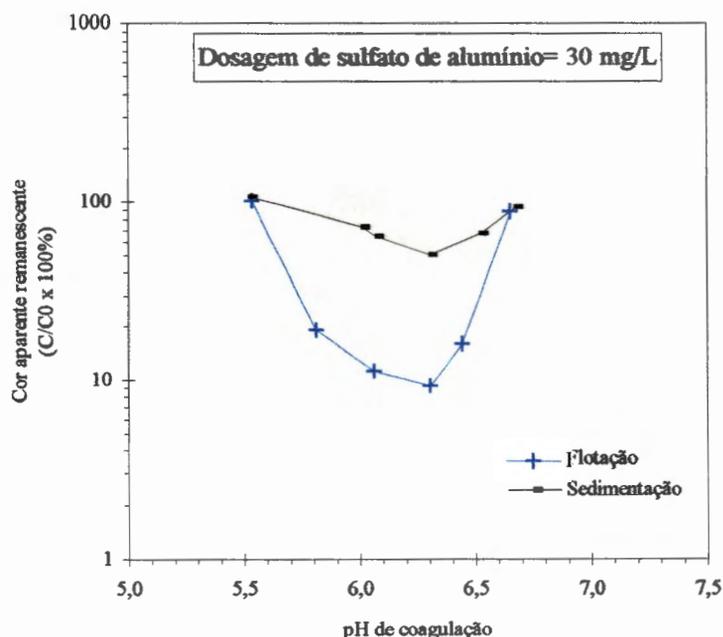


FIGURA 111 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 30 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo II. Ensaio de coagulação-floculação-flotação: velocidade de flotação= 16,25 cm/min; fração de recirculação= 8% (em volume); pressão de saturação= 441 kPa. Ensaio de coagulação-floculação-sedimentação: velocidade de sedimentação= 1,5 cm/min. Características da água de estudo: cor aparente= 263 uC; turbidez= 4,65 uT; temperatura=  $21,7 \pm 1,5$  °C (Fonte: tabela 29, apêndice 3).

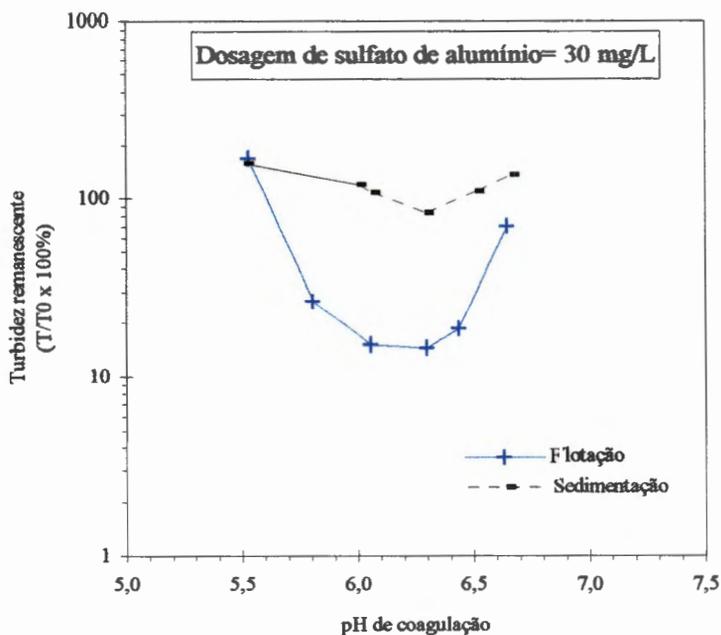


FIGURA 112 - Turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 30 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo II. Ensaio de coagulação-floculação-flotação: velocidade de flotação= 16,25 cm/min; fração de recirculação= 8% (em volume); pressão de saturação= 441 kPa. Ensaio de coagulação-floculação-sedimentação: velocidade de sedimentação= 1,5 cm/min. Características da água de estudo: cor aparente= 263 uC; turbidez= 4,65 uT; temperatura=  $21,7 \pm 1,5$  °C (Fonte: tabela 29, apêndice 3).

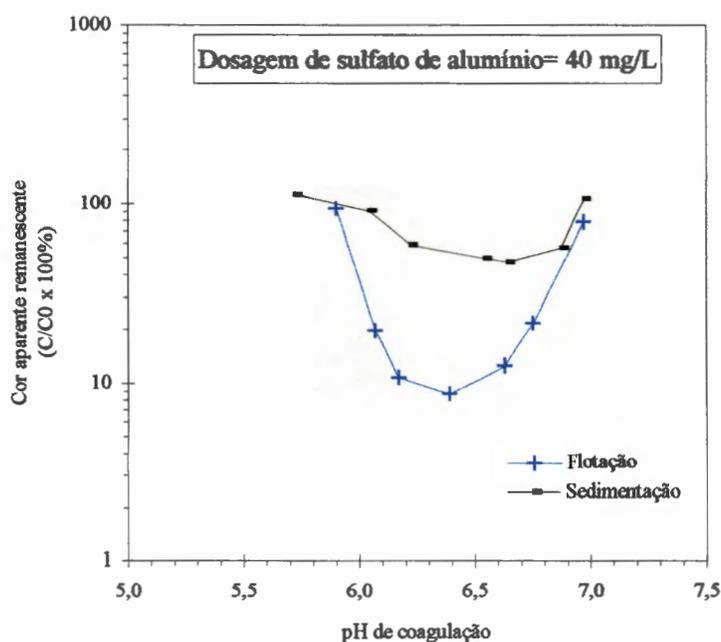


FIGURA 113 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 40 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo II. Ensaio de coagulação-floculação-flotação: velocidade de flotação= 16,25 cm/min; fração de recirculação= 8% (em volume); pressão de saturação= 441 kPa. Ensaio de coagulação-floculação-sedimentação: velocidade de sedimentação= 1,5 cm/min. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT; temperatura:  $21,7 \pm 1,5$  °C (Fonte: tabela 29, apêndice 3).

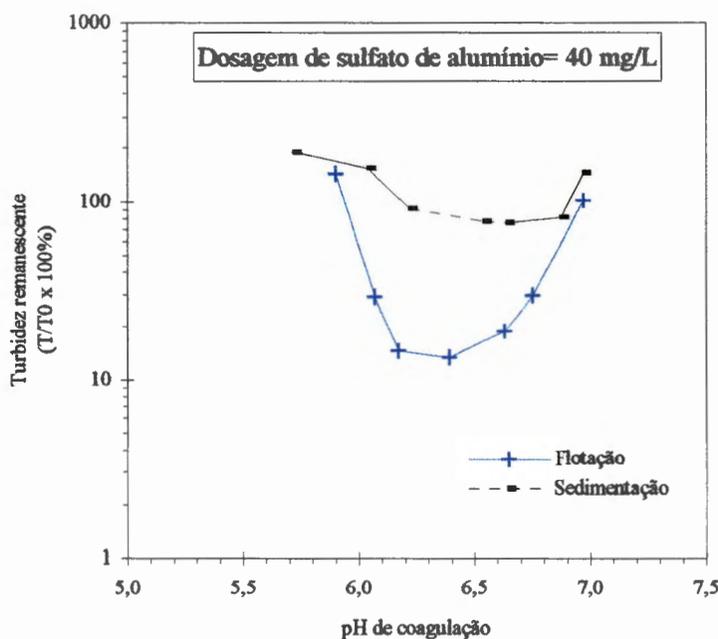


FIGURA 114 - Turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 40 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo II. Ensaio de coagulação-floculação-flotação: velocidade de flotação= 16,25 cm/min; fração de recirculação= 8% (em volume); pressão de saturação= 441 kPa. Ensaio de coagulação-floculação-sedimentação: velocidade de sedimentação= 1,5 cm/min. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT; temperatura:  $21,7 \pm 1,5$  °C (Fonte: tabela 29, apêndice 3).

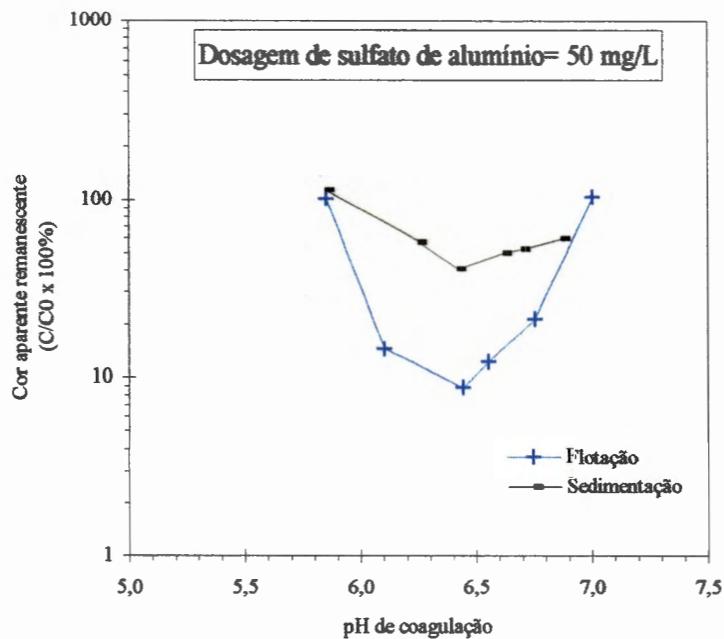


FIGURA 115 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 50 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo II. Ensaio de coagulação-floculação-flotação: velocidade de flotação= 16,25 cm/min; fração de recirculação= 8% (em volume); pressão de saturação= 441 kPa. Ensaio de coagulação-floculação-sedimentação: velocidade de sedimentação= 1,5 cm/min. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT; temperatura:  $21,7 \pm 1,5$  °C (Fonte: tabela 29, apêndice 3).

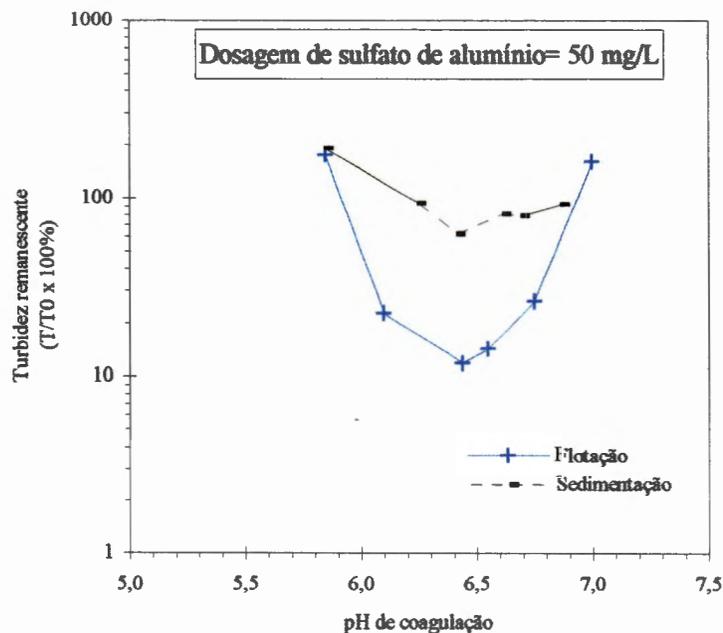


FIGURA 116 - Turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 50 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo II. Ensaio de coagulação-floculação-flotação: velocidade de flotação= 16,25 cm/min; fração de recirculação= 8% (em volume); pressão de saturação= 441 kPa. Ensaio de coagulação-floculação-sedimentação: velocidade de sedimentação= 1,5 cm/min. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT; temperatura:  $21,7 \pm 1,5$  °C (Fonte: tabela 29, apêndice 3).

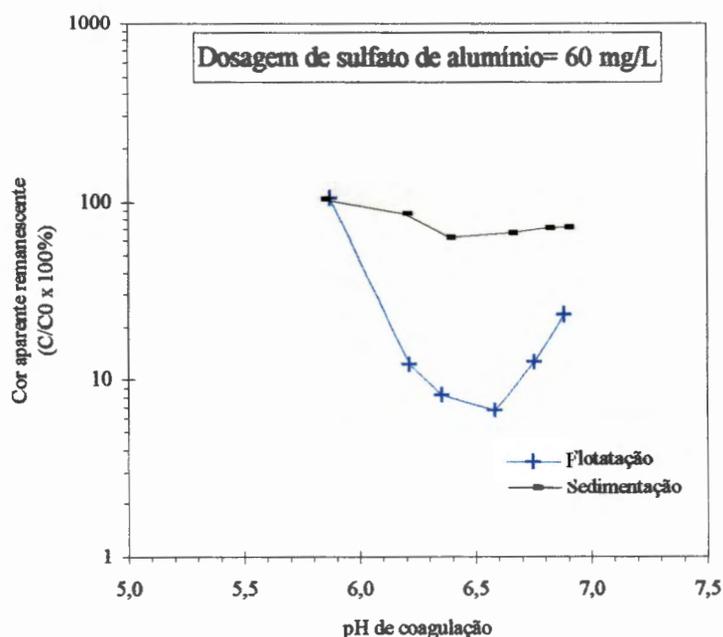


FIGURA 117 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 60 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo II. Ensaio de coagulação-floculação-flotação: velocidade de flotação= 16,25 cm/min; fração de recirculação= 8% (em volume); pressão de saturação= 441 kPa. Ensaio de coagulação-floculação-sedimentação: velocidade de sedimentação= 1,5 cm/min. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT; temperatura:  $21,7 \pm 1,5$  °C (Fonte: tabela 29, apêndice 3).

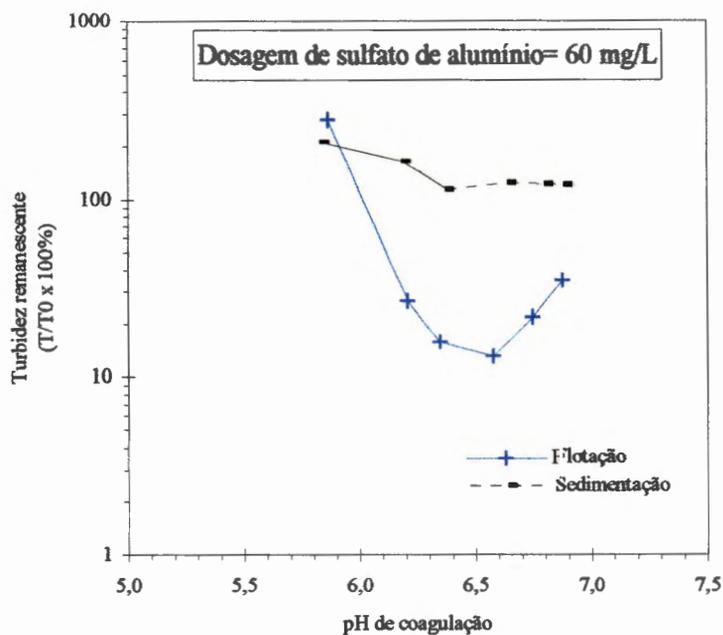


FIGURA 118 - Turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 60 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo II. Ensaio de coagulação-floculação-flotação: velocidade de flotação= 16,25 cm/min; fração de recirculação= 8% (em volume); pressão de saturação= 441 kPa. Ensaio de coagulação-floculação-sedimentação: velocidade de sedimentação= 1,5 cm/min. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT; temperatura:  $21,7 \pm 1,5$  °C (Fonte: tabela 29, apêndice 3).

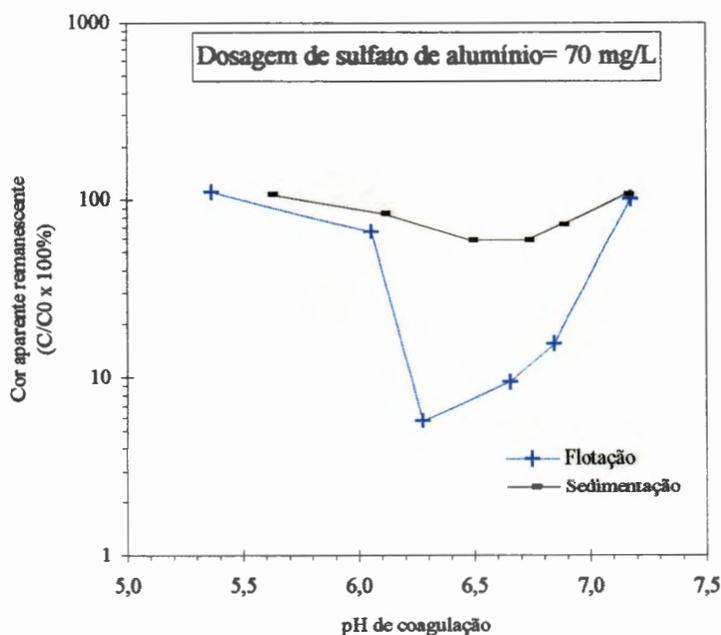


FIGURA 119 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 70 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo II. Ensaio de coagulação-floculação-flotação: velocidade de flotação= 16,25 cm/min; fração de recirculação= 8% (em volume); pressão de saturação= 441 kPa. Ensaio de coagulação-floculação-sedimentação: velocidade de sedimentação= 1,5 cm/min. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT; temperatura:  $21,7 \pm 1,5$  °C (Fonte: tabela 29, apêndice 3).

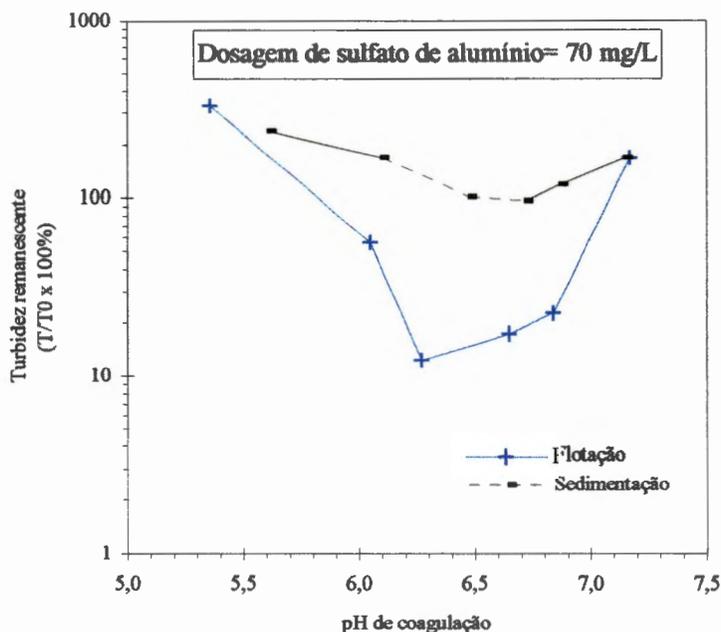


FIGURA 120 - Turbidez remanescente ( $T/T_0 \times 100\%$ ) em função do pH de coagulação para dosagem de sulfato de alumínio= 70 mg/L.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo II. Ensaio de coagulação-floculação-flotação: velocidade de flotação= 16,25 cm/min; fração de recirculação= 8% (em volume); pressão de saturação= 441 kPa. Ensaio de coagulação-floculação-sedimentação: velocidade de sedimentação= 1,5 cm/min. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT; temperatura:  $21,7 \pm 1,5$  °C (Fonte: tabela 29, apêndice 3).

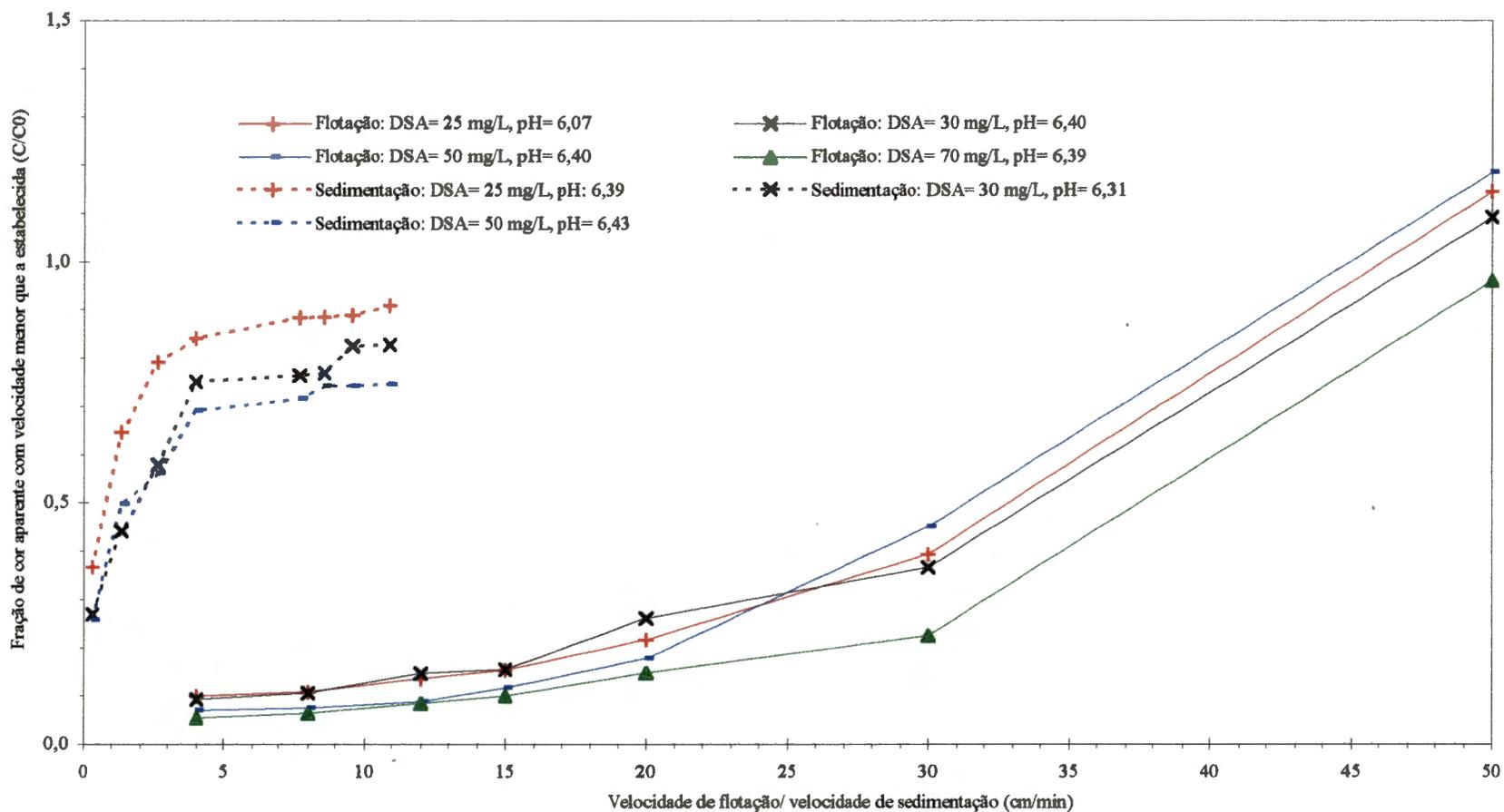


FIGURA 121 - Cor aparente remanescente (C/C0) em função da velocidade de flotação e velocidade de sedimentação para diferentes valores de dosagem de sulfato de alumínio.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo II. Ensaio de flotação: fração de recirculação: 8% (em volume); pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT, temperatura: 21,7 ± 1,5 °C (Fonte: tabela 30, apêndice 3).

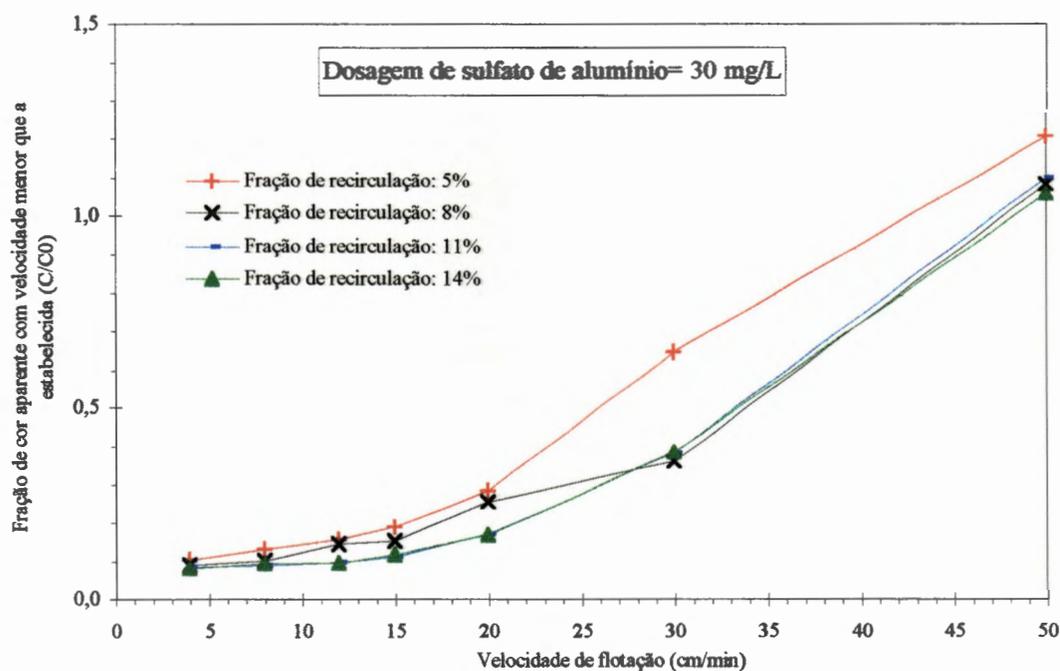


FIGURA 122 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 30 mg/L, variando-se a fração de recirculação.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo II. pH de coagulação:  $6,35 \pm 0,05$ , pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT, temperatura:  $21,7 \pm 1,5$  °C (Fonte: tabela 31, apêndice 3).

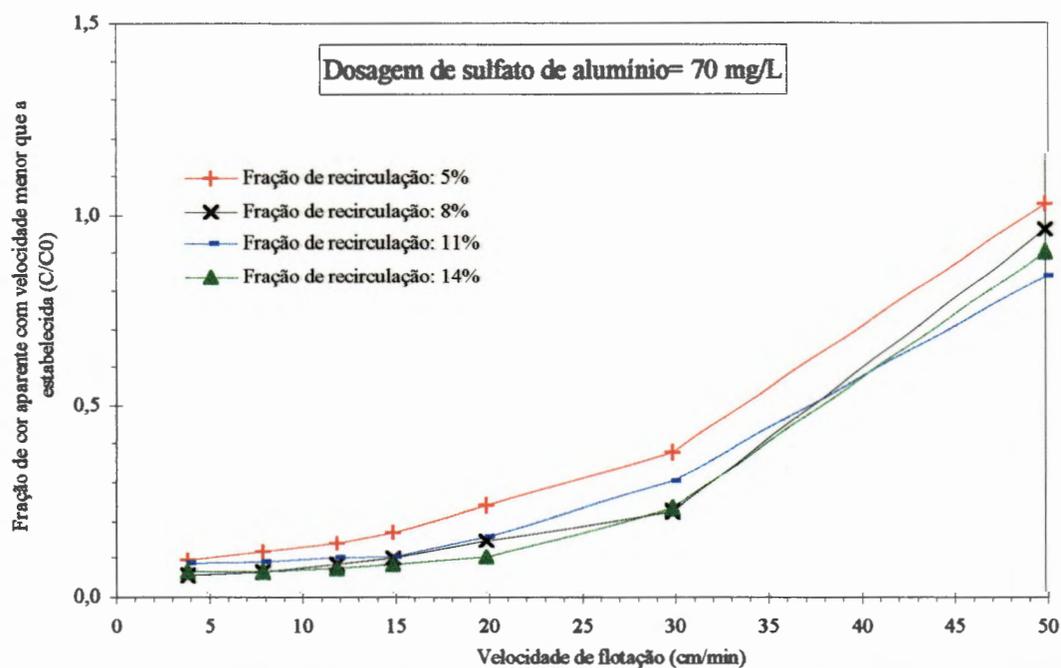


FIGURA 123 - Cor aparente remanescente ( $C/C_0$ ) em função da velocidade de flotação para dosagem de sulfato de alumínio= 70 mg/L, variando-se a fração de recirculação.

Ensaio realizado com o equipamento de flotateste e água tipo II. pH de coagulação:  $6,34 \pm 0,05$ , pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT, temperatura:  $21,7 \pm 1,5$  °C (Fonte: tabela 31, apêndice 3).

## 5.6 Resultados dos ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo para a água tipo II

Os resultados obtidos nos ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo com a água tipo II são apresentados nas figuras 124 a 127, a seguir. No Apêndice 4a são apresentadas as características gerais das carreiras de operação realizadas na instalação com escoamento contínuo para a referida água de estudo. As tabelas relacionadas às figuras apresentadas neste item estão no Apêndice 4b.

Como já mencionado anteriormente (item 4.1 e item 4.9), os ensaios realizados com a água tipo II foram feitos em parceria com a engenheira Margarida Marchetto, de maneira que a análise e discussão dos resultados obtidos são apresentados em cada trabalho somente no que corresponde aos objetivos de cada um. Então, na presente pesquisa, para a água em questão, a discussão é apresentada com relação a parâmetros de floculação variados para cada dosagem de sulfato de alumínio estudada (70, 50 e 30 mg/L), sendo que os demais parâmetros investigados (TAS aparente na câmara de flotação e quantidade de ar fornecida - Sp\*p) são discutidos em MARCHETTO (1996).

Para a água tipo II foram realizados 14 ensaios, nomeados de A a O, divididos em 4 carreiras de operação (ver figuras 124 a 127). Em cada ensaio houve variação de um dos parâmetros: dosagem de sulfato de alumínio, TAS aparente na câmara de flotação, Sp\*p ou escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação.

Todos os ensaios foram realizados utilizando-se três câmaras de floculação em série com tempo teórico de floculação de 24 min. Os escalonamentos do gradiente de velocidade médio de floculação investigados foram de 100-80-60, 80-60-60, 80-60-40 e 70-50-30 s<sup>-1</sup>. Foram estudados três valores de dosagem de sulfato de alumínio (70, 50 e 30 mg/L) em função dos resultados obtidos nos ensaios realizados com o equipamento de flotateste. Os valores utilizados de TAS aparente foram de  $273 \pm 7$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia,  $364 \pm 2$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia e  $555 \pm 14$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia. A variação estudada de Sp\*p esteve em torno de 3,7 a 7,9 g de ar/m<sup>3</sup> de água.

QUADRO 12 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo para a água tipo II:

DSA (mg/L)	Número de câmaras de floculação utilizadas	Tempo teórico de floculação-Tf- (min)	Gradiente de velocidade médio de floculação em 3 câmaras em série-Gf-(s <sup>-1</sup> )	TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	Veloc. de escoam. entre as placas - V <sub>placas</sub> -(cm/min)	Número de Reynolds entre as placas	Vazão afluente (L/h) - Água de estudo + Produtos químicos	Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	Maior eficiência de remoção obtida (%)			Ensaio	Figura	Tabela (Apêndice 4b)	Carreira de operação	
									Cor aparente	Turbidez	Sólidos susp. totais-SST-					
70	3	24	100 - 80 - 60	541	47	555	880	7,91 ± 0,04	70,6	36,8	76,4	B	124	32	1	
				a	a	a		6,31 ± 0,03	76,2	45,8	85,9	A	124	32	1	
				568	50	582		3,84 ± 0,18	80,4	62,3	87,7	C	124	32	1	
			80 - 60 - 40							79,3	62,7	82,6	D	124	32	1
			80 - 60 - 40	366	32	375	882	4,58 ± 0,11	82,9	71,2	86,4	E	125	33	2	
			70 - 50 - 30					84,4	73,2	86,4	F	125	33	2		
50	3	24	70 - 50 - 30	363	32	372	874	4,58 ± 0,11	84,1	74,0	86,5	G	125	33	2	
				270		277		6,61 ± 0,04	78,5	61,3	84,2	I	126	34	3	
				a	24	a		4,98 ± 0,05	82,3	65,6	89,7	H	126	34	3	
				279		286		4,03 ± 0,10	90,4	81,3	95,2	J	126	34	3	
30	3	24	70 - 50 - 30	266	23	273	860	4,96 ± 0,04	85,2	77,8	93,8	L	127	35	4	
				a						87,5	79,5	95,0	M	127	35	4
				269		276		4,14 ± 0,07	87,0	80,5	92,5	N	127	35	4	
			80 - 60 - 60					85,3	75,9	94,0	O	127	35	4		

Nas figuras 124 a 127 são mostrados os principais parâmetros operacionais, medidas de pH de coagulação e temperatura ao longo das carreiras de operação, valores de cor aparente, turbidez e SST remanescente, assim como, os respectivos valores de remoção. No quadro 12, mostrado na página anterior, é apresentado um resumo dos resultados mostrados nas figuras 124 a 127, referente às melhores eficiências de remoção de cor aparente, turbidez e SST obtidas.

Para DSA= 70 mg/L e TAS aparente  $\cong$  560 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia, os maiores valores de eficiência de remoção de cor aparente (80,4%) e SST (87,7%) foram obtidos para o escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação de 100-80-60 s<sup>-1</sup> (ensaio C, figura 124), cuja remoção de turbidez foi de 62,3%. Tais resultados são bastante próximos aos melhores resultados obtidos para o ensaio com escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação de 80-60-40 s<sup>-1</sup> (ensaio D, figura 124), os quais foram de 79,3% de remoção de cor aparente, 62,7% de remoção de turbidez e 82,6% de remoção de SST. Contudo, observando-se a figura 124, verifica-se que a qualidade do efluente se manteve mais estável no ensaio D. Então, para as referidas condições de ensaio, o escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação de 80-60-40 s<sup>-1</sup> demonstrou ser mais adequado para melhor desempenho da flotação.

Para DSA de 70 e TAS aparente  $\cong$  366 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia foram testados dois escalonamentos do gradiente de velocidade médio de floculação, sendo 80-60-40 s<sup>-1</sup> (ensaio E, figura 125) e 70-50-30 s<sup>-1</sup> (ensaio F, figura 125). O melhor desempenho da flotação foi obtido para o ensaio F sendo apresentados valores de eficiência de remoção de cor aparente, turbidez e SST de 84,4%, 73,2% e 86,4%, respectivamente.

Os ensaios nos quais empregou-se DSA de 50 mg/L foram realizados com um único escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação de 70-50-30 s<sup>-1</sup>. Utilizando-se DSA de 50 mg/L e TAS aparente  $\cong$  363 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>dia (ensaio G, figura 125), obteve-se eficiência de remoção de cor aparente, turbidez e SST de 84,1%, 74,0% e 86,5%, respectivamente, sendo resultados equivalentes aos obtidos no ensaio F (figura 125) para DSA de 70 mg/L. Esse fato mostra o desempenho equivalente da flotação com menor consumo de coagulante para um mesmo escalonamento do

gradiente de velocidade médio de floculação ( $70-50-30 \text{ s}^{-1}$ ), indicando a viabilidade de tal escalonamento. Os resultados obtidos para DSA de  $50 \text{ mg/L}$ , porém com TAS aparente  $\cong 270 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{dia}$  (ensaio J. figura 126), chegaram a 90,4% de remoção de cor aparente, 81,3% de remoção de turbidez e 95,2% de remoção de SST.

Os ensaios N e O (figura 127) nos quais empregou-se DSA de  $30 \text{ mg/L}$  e TAS  $\cong 270 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{dia}$ , podem ser comparados em termos da influência do escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação sobre o desempenho da flotação. Os valores dos escalonamentos do gradiente de velocidade médio de floculação foram de  $80-60-40$  e  $80-60-60 \text{ s}^{-1}$  para os ensaios N e O, respectivamente. Os resultados apresentados por ambos ensaios são bastante similares, porém eficiência de remoção de cor aparente ligeiramente superior foi obtida empregando-se o escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação de  $80-60-40 \text{ s}^{-1}$  (ensaio N).

De maneira geral, verifica-se que combinações do gradiente de velocidade médio de floculação entre  $30$  e  $80 \text{ s}^{-1}$ , preferencialmente com valores do gradiente de velocidade médio de floculação da última câmara de floculação entre  $30$  e  $40 \text{ s}^{-1}$ , para tempo de floculação de  $24 \text{ min}$  e três câmaras de floculação em série, mostraram-se adequadas para a clarificação por flotação da água estudada, considerando as condições de ensaio utilizadas.

Variáveis Investigadas	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio C	Ensaio D
DSA (mg/L)	70	70	70	70
Nº de câmaras de floculação	3	3	3	3
Tempo teórico de floc. (min)	24	24	24	24
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	100	100	100	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	80	80	60
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	60	60	60	40
Vazão afluyente (L/h)	880	880	880	880
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	558	568	542 ± 1	542 ± 1
Veloc. entre as placas (cm/min)	49	50	47	47
Nº de Reynolds entre as placas	572	582	556 ± 1	556 ± 1
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	6,31 ± 0,03	7,91 ± 0,04	3,84 ± 0,18	3,84 ± 0,18

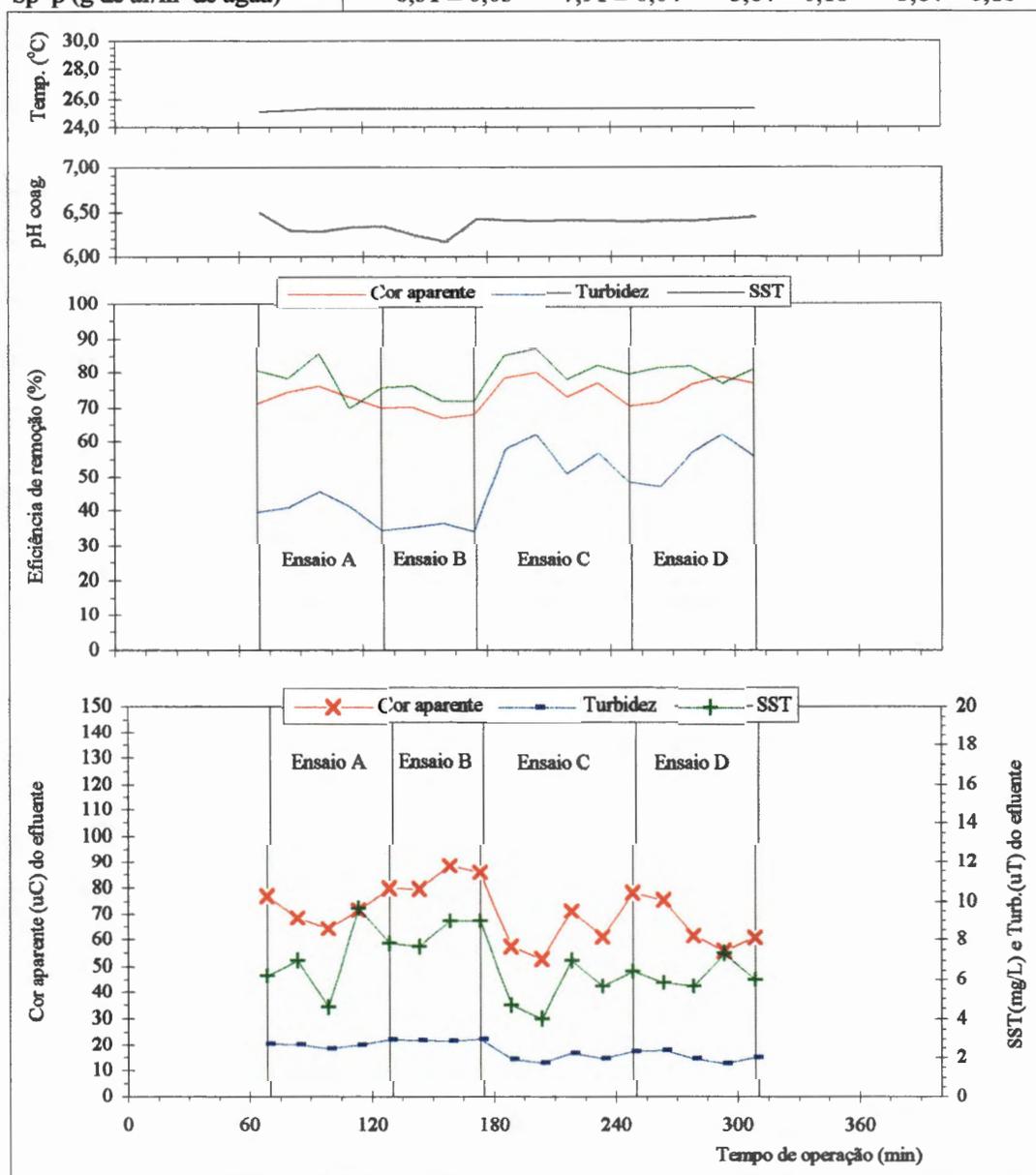


FIGURA 124 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 1 da instalação com escoamento contínuo (ensaios A, B, C e D) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos susp. totais, utilizando-se a água tipo II (Fonte: tabela 32, apêndice 4b).

Características da água de estudo	Cor apar.: 271 uC	Características da água floculada	SST: 32,5 mg/L
	Cor verd.: 233 uC		SSF: 17,5 mg/L
	Turbidez: 4,56 uT		SSV: 15 mg/L

Variáveis Investigadas	Ensaio E	Ensaio F	Ensaio G
DSA (mg/L)	70	70	50
Nº de câmaras de flocação	3	3	3
Tempo teórico de foc. (min)	24	24	24
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	70	70
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	60	50	50
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	40	30	30
Vazão afluyente (L/h)	882	882	874
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	366	366	363
Veloc. entre as placas (cm/min)	32	32	32
Nº de Reynolds entre as placas	375	375	372
Sp*p (g de ar/ m <sup>3</sup> de água)	4,58 ± 0,11	4,58 ± 0,11	4,58 ± 0,11

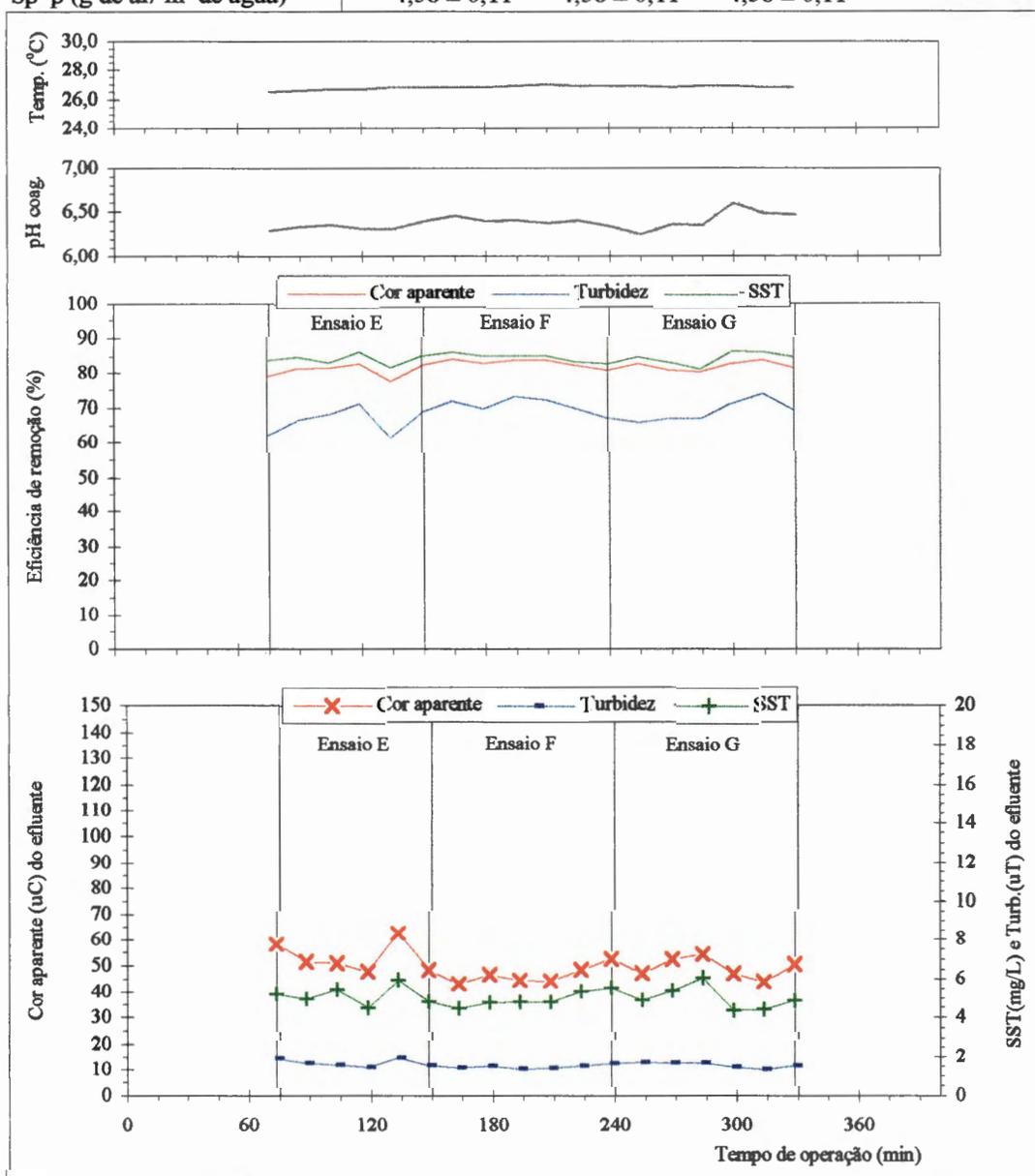


FIGURA 125 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 2 da instalação com escoamento contínuo (ensaios E, F e G) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos susp. totais, utilizando-se a água tipo II (Fonte: tabela 33, apêndice 4b).

Características da água de estudo	Cor apar.: 281 uC	Características da água floclada	SST: 33 mg/L
	Cor verd.: 237 uC		SSF: 21,5 mg/L
	Turbidez: 5,07 uT		SSV: 11,5 mg/L

Variáveis Investigadas	Ensaio H	Ensaio I	Ensaio J
DSA (mg/L)	50	50	50
Nº de câmaras de flocculação	3	3	3
Tempo teórico de floc. (min)	24	24	24
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	70	70	70
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	50	50	50
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	30	30	30
Vazão afluyente (L/h)	874	874	874
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	273	279	270
Veloc. entre as placas (cm/min)	24	24	24
Nº de Reynolds entre as placas	280	286	277
Sp*p (g de ar/ m <sup>3</sup> de água)	4,98 ± 0,05	6,61 ± 0,04	4,03 ± 0,1

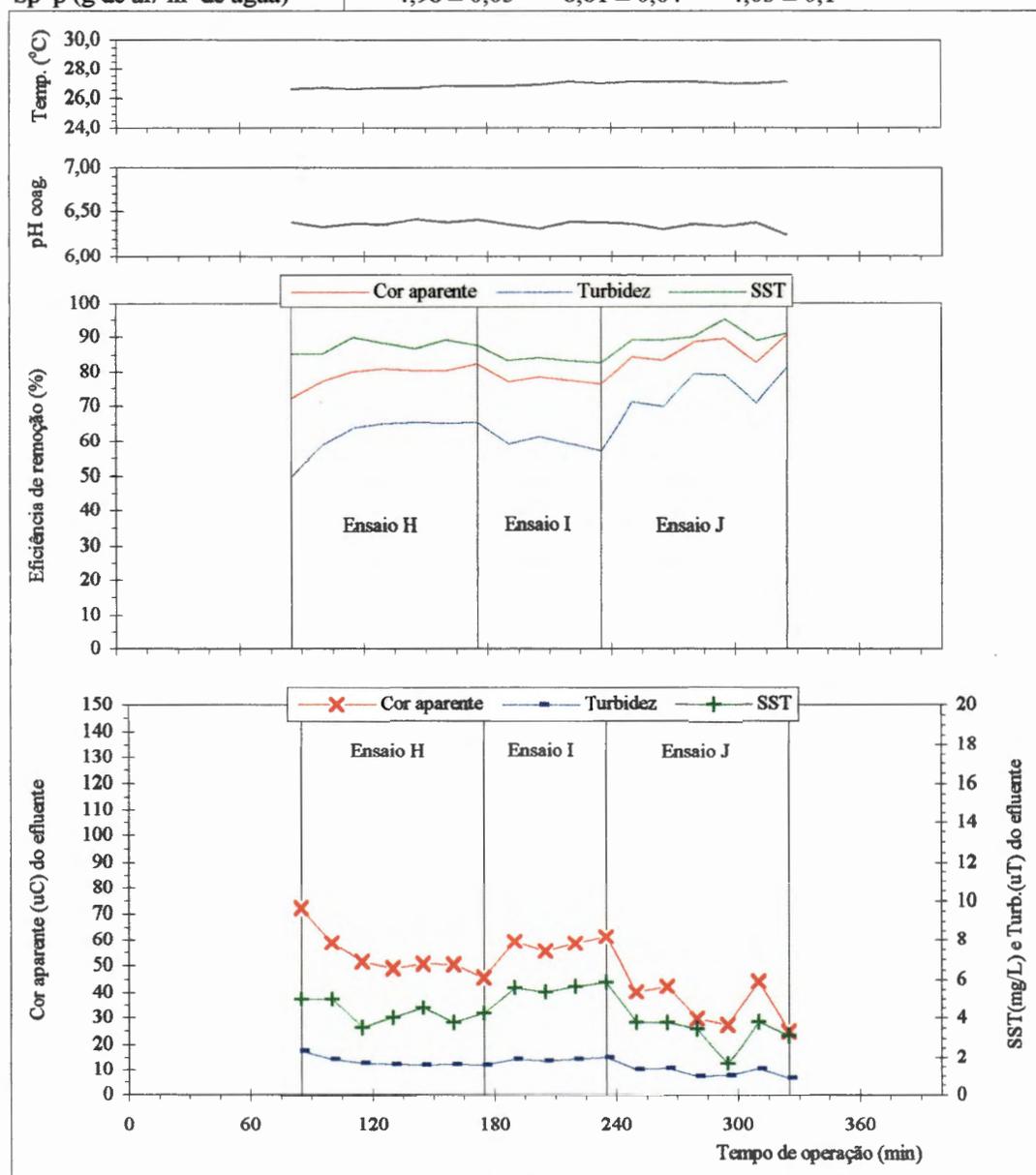


FIGURA 126 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 3 da instalação com escoamento contínuo (ensaios H, I e J) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos susp. totais, utilizando-se a água tipo II. (Fonte: tabela 34, apêndice 4b).

Características da água de estudo	Cor apar.: 258 uC	Características da água floculada	SST: 34 mg/L
	Cor verd.: 241 uC		SSF: 18,5 mg/L
	Turbidez: 4,65 uT		SSV: 15,5 mg/L

Variáveis Investigadas	Ensaio L	Ensaio M	Ensaio N	Ensaio O
DSA (mg/L)	30	30	30	30
Nº de câmaras de floculação	3	3	3	3
Tempo teórico de floc. (min)	24	24	24	24
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	70	70	80	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	50	50	60	60
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	30	30	40	60
Vazão afluyente (L/h)	860	860	860	860
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	269	266	266	266
Veloc. entre as placas (cm/min)	23	23	23	23
Nº de Reynolds entre as placas	276	273	273	273
Sp*p (g de ar/ m <sup>3</sup> de água)	4,96 ± 0,04	4,14 ± 0,07	4,14 ± 0,07	4,14 ± 0,07

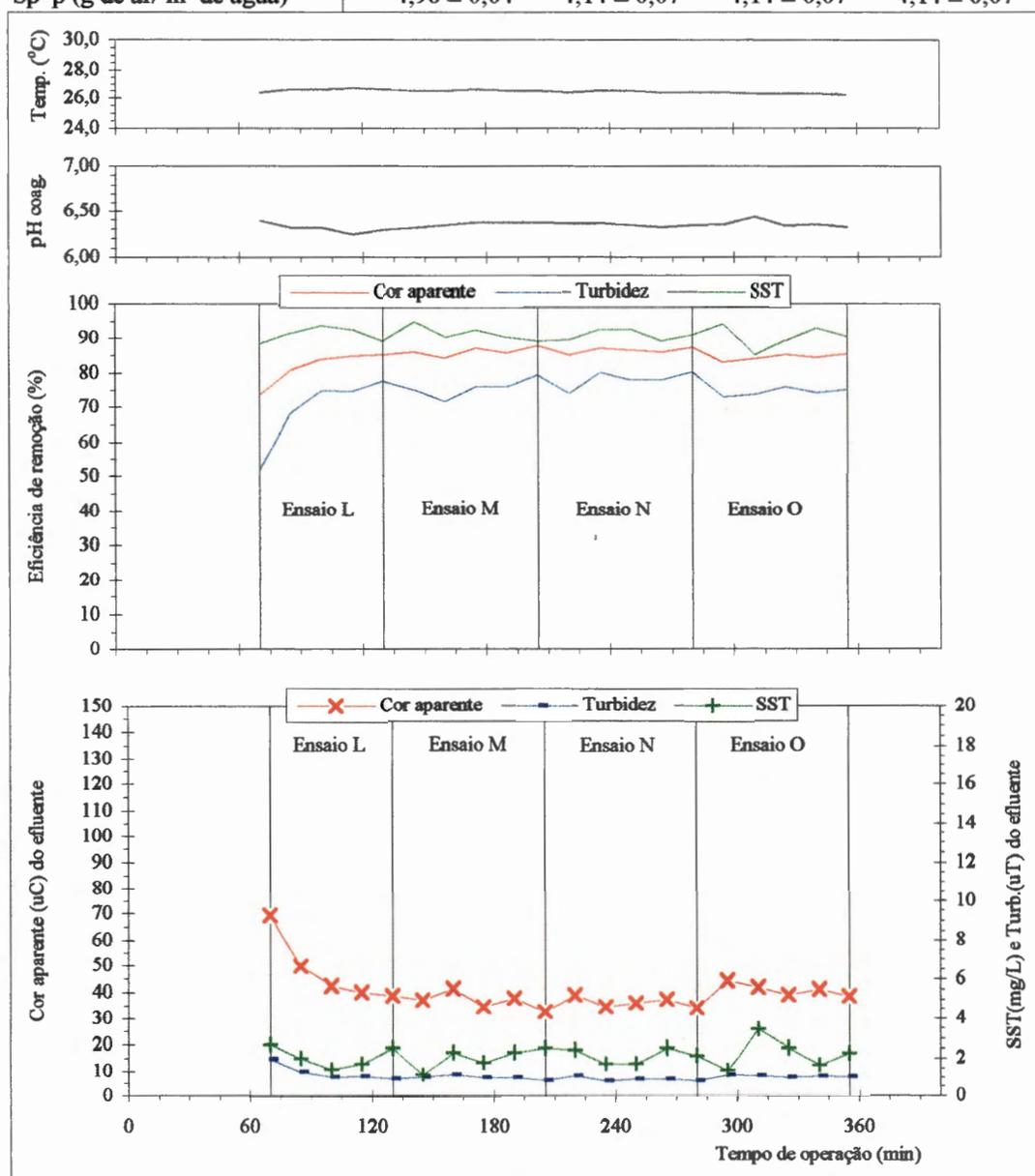


FIGURA 127 - Resultados obtidos durante a carreira de operação 4 da instalação com escoamento contínuo (ensaios L, M, N e O) em termos de cor aparente, turbidez e sólidos susp. totais, utilizando-se a água tipo II (Fonte: tabela 35, apêndice 4b).

Características da água de estudo	Cor apar.: 263 uC	Características da água floculada	SST: 23 mg/L
	Cor verd.: 244 uC		
	Turbidez: 4,1 uT		

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos durante a realização do presente trabalho, discutidos no capítulo anterior, é possível concluir-se que:

Para os ensaios realizados utilizando-se o reator estático de floculação-flotação por ar dissolvido (flotateste) e água tipo I:

- a otimização da dosagem de coagulante e pH de coagulação é necessária para que seja obtido bom desempenho da flotação;
- as condições ótimas de coagulação encontradas foram de dosagem de sulfato de alumínio de 40 mg/L e pH de coagulação na faixa de 6,2 a 6,5, tendo sido considerados aspectos como a eficiência de remoção, velocidade de flotação e consumo de coagulante;
- a fração de recirculação de 8% (em volume) com pressão na câmara de saturação de 441 kPa forneceu os melhores resultados;
- o gradiente de velocidade médio de mistura rápida de  $1000 \text{ s}^{-1}$  com tempo de mistura rápida de 10 s apresentaram a maior eficiência de remoção de cor aparente;
- o aumento do gradiente de velocidade médio de floculação para menores tempos de floculação conduziu a melhores resultados;
- a determinação do tempo de floculação ótimo é fundamental para o bom desempenho da flotação;
- os melhores resultados de remoção de cor aparente e turbidez foram obtidos para tempo de floculação de 20 min e gradiente de velocidade médio de floculação ótimo de  $60 \text{ s}^{-1}$ , sendo bastante similares aos resultados obtidos para tempo de floculação de 24 min e gradiente de velocidade médio de floculação de  $60 \text{ s}^{-1}$ .

- o escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação de 80-60  $s^{-1}$  (um dos escalonamentos definidos pela metodologia proposta por PÁDUA, 1994) apresentou os melhores resultados em termos de remoção de cor aparente, tanto para tempo de floculação de 24 min quanto para tempo de floculação de 12 min. Bons resultados foram obtidos utilizando-se combinações de gradiente de velocidade médio de floculação entre 60 e 100  $s^{-1}$ .
- os resultados obtidos, em termos de eficiência de remoção de cor aparente e turbidez, nos ensaios realizados no flotateste para tempo de floculação de 24 min, anteciparam de maneira bastante razoável os resultados obtidos na instalação com escoamento contínuo;
- o flotateste serviu para otimizar parâmetros de projeto como tempo de floculação e número de compartimentos da unidade de floculação assim como, valores de gradiente de velocidade médio a serem utilizados na unidade de floculação de uma instalação com escoamento contínuo.

Para os ensaios realizados utilizando-se a instalação com escoamento contínuo de coagulação-floculação-flotação por ar dissolvido de alta taxa e água tipo I:

- desde que as condições de coagulação e de floculação sejam adequadamente otimizadas, o desempenho da flotação foi relativamente equivalente tanto para TAS aparente na câmara de flotação de, aproximadamente, 360  $m^3/m^2$ dia quanto para 720  $m^3/m^2$ dia, para um determinado tempo de detenção na zona de contato;
- dentre os diversos valores estudados do gradiente de velocidade médio de floculação, as combinações com valores entre 40 e 120  $s^{-1}$ , proporcionaram os melhores resultados;
- o escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação teve pouca influência sobre o desempenho da flotação para o tempo de floculação de 24 min, enquanto que, para 12 min de floculação tal parâmetro apresentou influência mais significativa;
- a unidade de floculação com dois compartimentos em série mostrou-se eficiente para promover a floculação precedendo a flotação;

- o tempo de contato adequado da zona de contato bolhas-flocos é de importância crucial para o bom desempenho da flotação;
- quando operada nas melhores condições de floculação, ou seja, tempo de floculação de 24 min, duas câmaras em série com  $Gf = 80 \text{ s}^{-1}$  na primeira câmara e  $Gf = 60 \text{ s}^{-1}$  na segunda câmara, a unidade com escoamento contínuo apresentou remoção de até 92,0% de cor aparente (cor aparente do efluente de 8 uC), 90,4% de turbidez (turbidez do efluente de 0,55 uT) e 97,4% de SST (SST do efluente de 0,8 mg/L). Com 12 min de floculação,  $Gf = 100 \text{ s}^{-1}$  na primeira câmara e  $Gf = 80 \text{ s}^{-1}$  na segunda câmara, a unidade apresentou remoção de até 86,0% de cor aparente (efluente com cor aparente de 15 uC), 86,7% de turbidez (0,80 uT no efluente) e 90,9% de SST (SST no efluente de 3,0 mg/L). Em ambos os casos, tais resultados foram alcançados para velocidade de escoamento entre as placas na câmara de flotação de 31 cm/min ( $TAS_{ap} \cong 360 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{dia}$ )

Para os ensaios realizados utilizando-se o reator estático e água tipo II:

- as condições otimizadas de coagulação nem sempre foram iguais quando obtidas em ensaios de coagulação-floculação-flotação e de coagulação-floculação-sedimentação;
- em ensaios de clarificação por flotação, os valores de dosagem de sulfato de alumínio de 30, 50 e 70 mg/L com respectivos valores de pH de coagulação de 6,31; 6,45 e 6,28, apresentaram ótimos resultados de remoção de cor aparente e turbidez, sendo relativamente similares entre si;
- tendo em vista o consumo de sulfato de alumínio e remoção obtida de cor aparente e de turbidez, pôde-se considerar como dosagem ótima para ensaios de clarificação por flotação a dosagem de 30 mg/L com pH de coagulação de aproximadamente 6,3;
- nos ensaios de clarificação por sedimentação, as condições ótimas de coagulação foram de 50 mg/L de dosagem de sulfato de alumínio para pH de coagulação de aproximadamente 6,4.

Para os ensaios realizados utilizando-se a instalação com escoamento contínuo e água tipo II:

- considerando as condições empregadas nos ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo utilizando-se a água tipo II, verificou-se que para combinações do gradiente de velocidade médio de floculação entre 30 e 80  $s^{-1}$ , preferencialmente com valores do gradiente de velocidade médio de floculação da última câmara de floculação entre 30 e 40  $s^{-1}$ , para tempo de floculação de 24 min e três câmaras de floculação em série, mostraram-se adequadas para a clarificação por flotação da água estudada.

As recomendações sugeridas são:

- que a otimização da dosagem de coagulante e pH de coagulação visando a clarificação por flotação seja feita utilizando-se equipamento de flotatestes;
- em estudos semelhantes ao deste trabalho, recomenda-se a instalação de um dispositivo que permita o desvio de parcela de água previamente floculada, no final da última câmara de floculação da instalação com escoamento contínuo. Tal dispositivo deverá estar acoplado a um medidor adequado da vazão efluente, de maneira que em estudos de variação do tempo de floculação, a vazão afluente à câmara de flotação seja mantida sempre constante, assegurando a mesma velocidade de escoamento na zona de contato e zona de separação;
- que sejam feitos novos ensaios na instalação com escoamento contínuo utilizada neste trabalho para tempos de floculação entre 8 e 24 min, empregando-se uma, duas ou três câmaras em série, mantendo-se constante a vazão afluente à câmara de flotação, após adoção da sugestão anterior;
- a realização de outros ensaios utilizando-se a instalação com escoamento contínuo, empregando-se tempo de floculação de 12 min, com maior tempo de detenção na zona de contato bolhas-flocos para verificar sua viabilidade no tratamento da água tipo I;

- que sejam realizadas novas pesquisas visando relacionar o tempo de floculação otimizado no equipamento de flotateste com o tempo de detenção a ser aplicado em instalação com escoamento contínuo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. (1992). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 18.ed. Washington, APHA/AWWA/WEF.
- AMIRTHARAJAH, A. (1989). The mechanisms of coagulation. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE COAGULAÇÃO E FILTRAÇÃO DIRETA. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- AMIRTHARAJAH, A., MILLS, K. M. (1982). Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. *Journal AWWA - Research and Technology*, p.210-216, Apr.
- AMIRTHARAJAH, A., O'MELIA, C. R. (1990). Coagulation processes: destabilization, mixing, and flocculation. In: AWWA, *Water quality and treatment: a handbook of community water supplies*. 4th ed. United States, McGraw-Hill, Inc. Chapter 6, p.269-365.
- AMIRTHARAJAH, A., TRUSLER, S. L. (1986). Destabilization of particles by turbulent rapid mixing. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, v.112, n.6, p.1085-1108, Dec.
- ANDREU-VILLEGAS, R., LETTERMAN, R. D. (1976). Optimizing flocculator power input. *Journal of the Environmental Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, v.102, n.EE2, p.251-263, Apr.
- ARBOLEDA VALENCIA, J. (1992). *Teoria y practica de la purificacion del agua*. Colômbia, ACODAL.
- ARGAMAN, Y. A. (1971). Pilot-plant studies of flocculation. *Journal AWWA*, p.775-777. Dec.
- AWWA, Coagulation Committee. (1989). Committee report: coagulation as an integrated water treatment process. *Journal AWWA: Research and Technology*, p.72-78, Oct.
- AZEVEDO NETTO, J. M. et al. (1987). *Técnica de abastecimento e tratamento de água*. 2.ed., São Paulo, CETESB/ASCETESB, v.2.

- BRATBY, J. (1983). Batch flotation tests: how useful are they? *Journal WPCF*, v.55, n.1, p.110-113, Jan.
- BRATBY, J. R. (1981). Interpreting laboratory results for the design of mixing and flocculation systems. *Journal AWWA - Research and Technology*, p.318-325, Apr.
- CAMP, T. R. (1955). Flocculation and flocculation basins. *ASCE Transactions*. v. 120, p.1-16.
- CAMPOS, J. R. (1980). *Emprego do amido de batata como auxiliar de floculação de águas para abastecimento*. São Carlos. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CAMPOS, J. R., REALI, M. A. P., DOMBROSKI, S. A. G., MARCHETTO, M., LIMA, M. R. A. (1996). Tratamento físico-químico por flotação de efluentes de reatores anaeróbios. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 25., México, D.F.. /No prelo/
- ♣ CLEASBY, J. L. (1984). Is velocity gradient a valid turbulent flocculation parameter? *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, v.110, n.5, p.875-897, Oct.
- ♣ COELHO, E. R. C., REALI, M. A. P., CAMPOS, J. R. (1991). Emprego da flotação por ar dissolvido na clarificação de águas para abastecimento: influência da taxa de aplicação superficial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 16., Goiânia, 1991. *Anais*. Goiânia, ABES.
- DI BERNARDO, L. (1993). *Métodos e técnicas de tratamento de água*. Rio de Janeiro, ABES, v.1.
- DI BERNARDO, L., MENDES, C. G. DA N., GUIMARÃES, A. F. (1987). Coagulação-floculação de águas com turbidez ou cor elevada. *Revista DAE*, v.47, n.150, p.227-239, dez.
- DOMBROSKI, S. A. G., REALI, M. A. P., MARCHETTO, M. (1996). Método eficiente para o tratamento de água com cor elevada e baixa turbidez: flotação por ar dissolvido. In: SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 3., Gramado, 1996. *Anais*. Gramado, ABES/ANDIS.
- EDWARDS, G. A., AMIRTHARAJAH, A. (1985). Removing color caused by humic acids. *Journal AWWA - Research and Technology*, p.50-57. Mar.
- ♣ EDZWALD, J. K. (1995). Principles and applications of dissolved air flotation. In: IVEY, K. J., BERNHARDT, H. J., eds. *Flotation processes in water and sludge treatment*. Water Science and Technology, Great Britain, v.31, n.3-4, p.1-23.

- ④ EDZWALD, J. K., WALSH, J. P., KAMINSKY, G. S., DUNN, H. J. (1992). Flocculation and air requirements for dissolved air flotation. *Journal AWWA - Research and Technology*, p.92-100, Mar.
- ④ EDZWALD, J. K., WINGLER, B. J. (1990). Chemical and physical aspects of dissolved-air flotation for the removal of algae. *Aqua*, v.29, p.24-35.
- ④ FUKUSHI, K., TAMBO, N., MATSUI, Y. (1995). A kinetic model for dissolved air flotation in water and wastewater treatment. In: IVES, K. J., BERNHARDT, H. J., eds. *Flotation processes in water and sludge treatment*. Water Science and Technology, Great Britain, v.31, n.3-4, p.37-47.
- ④ GOCHIN, R. J., SOLARI, J. (1983). The role of hydrofobicity in dissolved air flotation. *Water Res.*, v.17, n.6, p.651-657.
- ④ GREGORY, R., ZABEL, T. F. (1990). Sedimentation and flotation. In: AWWA, *Water quality and treatment: a handbook of community water supplies*. 4th ed. United States, McGraw-Hill, Inc. Chapter 7, p.367-453.
- ④ HAARHOFF, J., VAN VUUREN, L. R. J. (1995). Design parameters for dissolved air flotation in South Africa. In: IVES, K. J., BERNHARDT, H. J., eds. *Flotation processes in water and sludge treatment*. Water Science and Technology, Great Britain, v.31, n.3-4, p.203-212.
- HAHN, H. H. (1984). Wastewater treatment. In: IVES, K. J. ed. *The scientific basis of flotation*. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on The Scientific Basis of Flotation, Cambridge, England, 1982, Jul, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, p.379-414.
- ④ HAMANN JR., C. L., McEWEN, J. B., MYERS, A. G. (1990). Guide to selection of water treatment processes. In: AWWA, *Water quality and treatment: a handbook of community water supplies*. 4th ed. United States, McGraw-Hill, Inc. Chapter 3, p.157-187.
- HARRIS, H. S., KAUFMAN, W. J., KRONE, R. B. (1966). Orthokinetic flocculation in water purification. *Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, v.92, n.SA6, p.95-111, Apr.
- ④ HEINÄNEN, J., JOKELA, P., ALA-PEIJARI, T. (1995). Use of dissolved air flotation in potable water treatment in Finland. In: IVES, K. J., BERNHARDT, H. J., eds. *Flotation processes in water and sludge treatment*. Water Science and Technology, Great Britain, v.31, n.3-4, p.225-238.
- HESPANHOL, I. (1977). Mistura - grades e reatores tubulares; floculação - o uso de polieletrólitos. *Revista DAE*, n.112, p.83-92.

- ♠ HYDE, R. A., MILLER, D. G., PACKHAM, R. F., RICHARDS, W. N. (1977). Water clarification by flotation. *Journal AWWA - Water Technology/Quality*, p.369-374, Jul.
- JANSSENS, J. G. (1992). Developments in coagulation, flocculation and dissolved air flotation. *WATER/Engineering & Management*, p.26-31, Jan.
- JOHNSON, P. N., AMIRTHARAJAH, A. (1983). Ferric chloride and alum as single and dual coagulants. *Journal AWWA - Research and Technology*. p.232-239, May.
- KAMINSKI, G. S., DUNN, H. J., EDZWALD, J. K. (1991). Comparison of dissolved air flotation to other high rate clarification methods. *Water Research for the New Decade Proceedings - AWWA Annual Conference*, p.345-365.
- ℓ KITCHENER, J. A. (1984). The froth flotation process: past, present and future - in brief. In: IVES, K. J. ed. *The scientific basis of flotation*. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on The Scientific Basis of Flotation, Cambridge, England, 1982, Jul, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, p.3-51.
- ♣ KROFTA, M., GUSS, D. B. (1993). A new flotation/filtration system for water treatment and recycling. *Pulp & Paper Canada*, v.94, n.10, p.49-50.
- ♠ KROFTA, M., WANG, L. K. (1982). Potable water treatment by dissolved air flotation and filtration. *Journal AWWA - Research and Technology*, v.74, n.6, p.305-310, Jun.
- ♠ LOBATO, S. J. M., REALI, M. A. P., FAITANIN, L. (1995). O sucesso do emprego da flotação por ar dissolvido no pré-tratamento da água bruta da E.T.A. Meaípe-ES. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 18., Salvador, 1995. *Anais*. Disco5/9. Salvador, ABES.
- ♠ LONGHURST, S. J., GRAHAM, N. J. D. (1987). Dissolved air flotation for potable water treatment: a survey of operational units in Great Britain. *The Public Health Engineer*, v.14, n.6, p.71-76, Apr.
- ♠ LUNDGREN, H. (1970). Recent advances in air flotation technology. *Tappi*, v.53, n.2, p.287-289.
- MALLEY J. P., EDZWALD, J. K. (1991a). Concepts for dissolved-air flotation treatment of drinking waters. *Aqua*. V.40, n.1, p.7-17.
- MALLEY J. P., EDZWALD, J. K. (1991b). Laboratory comparison of DAF with conventional treatment. *Journal AWWA - Research and Technology*, p.56-61, Sep.
- MARCHETTO, M. (1996). *Estudo de uma unidade de flotação por ar dissolvido com escoamento horizontal entre placas aplicada ao tratamento de água de*

- abastecimento*. São Carlos. 179p., Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ♠ McCONNACHIE, G. L. (1991). Turbulence intensity of mixing in relation to flocculation. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, v.117, n.6, p.731-750, Nov/Dec.
- MENDES, C. G. DA N. (1989). *Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis*. São Carlos. 244p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ♠ MOUCHET, P. (1983). Applications de la flottation dans le traitement des eaux. Développements de la flottation à air dissous. *Industrie Minérale - Les Techniques*, p.312-330, Juin.
- ♠ NICKOLS, D. MOERSHELL, G. C., BRODER, M. V. (1995). The first DAF water treatment plant in the United States. In: IVES, K. J., BERNHARDT, H. J., eds. *Flotation processes in water and sludge treatment*. Water Science and Technology, Great Britain, v.31, n.3-4, p.239-246.
- ♠ O'MELIA, C. R. (1972). Coagulation and flocculation. In WEBER JR., W. J. ed. *Physicochemical processes for water quality*. New York, Wiley Interscience, v.2, p.61-107.
- ♠ ØDEGAARD, H. (1995). Optimization of flocculation/flotation in chemical wastewater treatment. In: IVES, K. J., BERNHARDT, H. J., eds. *Flotation processes in water and sludge treatment*. Water Science and Technology, Great Britain, v.31, n.3-4, p.73-82.
- ♠ OFFRINGA, G. (1995). Dissolved air flotation in Southern Africa. In: IVES, K. J., BERNHARDT, H. J., eds. *Flotation processes in water and sludge treatment*. Water Science and Technology, Great Britain, v.31, n.3-4, p.159-172.
- PÁDUA, V. L. DE (1994). *Metodologia para determinação dos gradientes de velocidade médios em unidades de floculação de mistura completa com câmaras em série e escoamento contínuo a partir de ensaios em reatores estáticos*. São Carlos. 74p., Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- REALI, M. A. P. (1984). *Aplicação da flotação por ar dissolvido ao tratamento de águas de abastecimento*. São Carlos. 186p., Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- REALI, M. A. P. (1991). *Concepção e avaliação de um sistema compacto para tratamento de águas de abastecimento utilizando o processo de flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante*. São Carlos. 373p., v1 e v.2. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- REALI, M. A. P., CAMPOS, J. R. (1992). Projeto de câmaras de saturação de sistemas de flotação por ar dissolvido, com recheio de pvc. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 23., La Habana, Cuba, 1992. *Anais*. v.2, parte 1, La Habana, Cuba, AIDIS. p.283-296.
- REALI, M. A. P., CAMPOS, J. R. (1995). Optimization of color removal using a batch flotation test. In: WORLDWIDE SYMPOSIUM: POLLUTION IN LARGE CITIES - science and technology for planning environmental quality. OMS/OPS, Venice, 1995. *Proceedings*. SIBESA, 2., Venice, ABES/ANDIS, p.199-210.
- REALI, M. A. P., DOMBROSKI, S. A. G. (1996). Influência da floculação sobre a flotação por ar dissolvido. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 25., México, D.F.. /No prelo/
- REALI, M. A. P., GIANOTTI, E. P. (1993). Remoção de algas por flotação: testes de laboratório. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17., Natal, 1993. *Anais*. v.2, Natal, ABES. p.229-242
- REALI, M. A. P., MARCHETTO, M. (1996). Unidade de flotação por ar dissolvido com escoamento horizontal entre placas aplicada ao tratamento de água. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 25., México, D.F.. /No prelo/
- REES, A. J., RODMAN, D. J., ZABEL, T. F. (1979). *Water clarification by flotation* - 5. Medmenham. (Water Research Centre - Technical Report TR 114, Apr.).
- RICHTER, C. A. (1986). Sistemas de floculação acelerada. *Revista DAE*, v.45, n.145, p.149-155, jun.
- SCHNEIDER, O. D., NICKOLS, D., LEHAN, E. R. (1991). Dissolved air flotation and polyaluminum chloride - an effective, economical combination. *Water Research for the New Decade Proceedings - AWWA Anual Conference*, p.367-383.
- SHERGOLD, H. L. (1984). Flotation in mineral processing. In: IVES, K. J. ed. *The scientific basis of flotation*. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on The Scientific Basis of Flotation, Cambridge, England, 1982, Jul, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, p.229-287.
- STUMM, W., O'MELIA, C. R. (1968). Stoichiometry of coagulation. *Journal AWWA*, p.514-539, May.

- Ⓢ TATE, C. H., ARNOLD, K. F. (1990). Health and aesthetic aspects of water quality. In: AWWA, *Water quality and treatment: a handbook of community water supplies*. 4th ed. United States, McGraw-Hill, Inc. Chapter 2, p.63-156.
- VALLANCE, B. C., PRITCHARD, R. G., HARGESHEIMER, E.E., SEIDNER, R. T. (1995). Consideration of DAF retrofit to a large conventional water treatment plant. In: IVES, K. J., BERNHARDT, H. J., eds. *Flotation processes in water and sludge treatment*. Water Science and Technology, Great Britain, v.31, n.3-4, p.93-101.
- Ⓢ VAN PUFFELEN, J., BUIJS, P.J., NUHN, P. N. A. M., HIJNEN, W. A. M. (1995). Dissolved air flotation in potable water treatment: the Dutch experience. In: IVES, K. J., BERNHARDT, H. J., eds. *Flotation processes in water and sludge treatment*. Water Science and Technology, Great Britain, v.31, n.3-4, p.149-157.
- WEAST, R. C. (1989). *Handbook of chemistry and physics*. 70.ed.. Boca Raton, CRC.
- Ⓢ ZABEL, T. (1984). Flotation in water treatment. In: IVES, K. J. ed. *The scientific basis of flotation*. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on The Scientific Basis of Flotation, Cambridge, England, 1982, Jul, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, p.349-377.
- ZABEL, T. (1985). The advantages of dissolved-air flotation for water treatment. *Journal AWWA - Management and Operations*, p.42-46, May.
- ZABEL, T. F., HYDE, R. A. (1976). Factors influencing dissolved air flotation as applied to water clarification. Presented to Water Research Center Conference on Flotation for Water and Waste Treatment, England, paper 8, p.180-218.

## Apêndice 1

Tabelas referentes aos ensaios realizados com o equipamento de flotateste para a água  
tipo I



TABELA 1 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático em função da variação da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação. Dosagens de sulfato de alumínio - DSA- testadas: 10, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 e 70 mg/L; pH de coagulação: entre 5,5 e 7,5; velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; pressão de saturação: 441 kPa; fração de recirculação: 8% (em volume). Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT, temperatura: 25,6 ± 1,6 °C.

DSA (mg/L)	Dosagem de barrilha (mg/L)	Dosagem de ácido clorídrico (mL/L)*	pH após mistura rápida	Temperatura após mistura rápida (°C)	Vf1= 31,6 cm/min				Vf2= 13,3 cm/min				Vf3= 6,7 cm/min				Vf4= 2,9 cm/min			
					Remanescente		Remoção (%)**		Remanescente		Remoção (%)**		Remanescente		Remoção (%)**		Remanescente		Remoção (%)**	
					Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez
10	-	2,5	6,02	24,4	101	6,89	6,7	7,0	100	6,48	17,3	20,5	80	5,05	25,4	29,5	71	4,40	28,1	32,4
10	-	1,25	6,32	25,1	110	8,32	37,8	43,7	58	1,93	69,1	74,6	22	1,58	78,1	76,2	22	1,53	78,1	76,4
10	-	-	6,50	24,8	121	8,94	38,4	30,6	48	3,36	71,3	65,3	24	2,00	78,8	71,8	20	1,77	79,8	72,8
10	25,0	-	6,75	25,0	99	6,54	0,1	1,5	100	6,42	0,5	3,2	99	6,30	1,4	4,1	97	6,21	2,1	4,5
10	50,0	-	7,05	25,1	115	7,88	-15,1	-16,4	114	7,42	-13,9	-14,5	113	7,50	-13,1	-14,4	112	7,41	-12,8	-14,0
20	-	2,5	5,61	24,4	103	7,45	-2,9	-11,9	102	7,18	-1,6	-11,1	103	7,32	0,7	-10,6	96	7,14	2,8	-9,8
20	-	1,5	5,98	26,2	68	4,48	69,6	71,2	18	0,98	87,7	89,3	11	0,64	90,2	91,0	9	0,56	90,8	91,4
20	-	-	6,21	25,5	78	5,57	60,6	59,3	29	1,59	80,8	79,1	16	1,29	84,6	80,3	15	1,27	84,9	80,4
20	25,0	-	6,57	26,0	116	6,58	42,8	43,0	42	3,61	73,9	72,3	22	1,30	79,9	82,2	19	1,10	80,6	83,1
20	50,0	-	6,96	25,9	106	7,37	-9,6	-15,2	108	7,34	-11,3	-17,9	110	7,60	-12,2	-20,8	111	7,95	-12,5	-22,3
20	75,0	-	7,20	25,5	96	6,09	-2,3	2,7	104	6,33	-3,8	0,3	102	6,87	-3,3	2,2	102	6,16	-3,3	5,3
30	-	2,5	5,50	25,2	95	12,4	-4,4	-106,9	112	13,93	-4,1	-112,6	95	14,0	-3,6	-110,0	105	13,50	-6,5	-107,7
30	-	1,0	5,84	26,2	58	3,62	67,6	70,8	25	1,37	80,5	83,5	18	1,06	82,6	85,6	17	0,89	83,0	86,4
30	-	-	6,16	25,1	74	4,92	63,1	63,2	26	1,70	81,9	82,7	17	1,06	85,6	86,6	13	0,80	86,6	87,7
30	11,25	-	6,49	26,7	83	5,79	61,9	58,7	26	2,05	85,5	84,9	11	0,65	89,5	90,4	10	0,62	89,5	90,5
30	50,0	-	7,00	24,6	86	8,10	49,9	36,3	46	3,47	72,4	71,2	25	1,44	80,1	79,9	18	1,25	82,0	80,7
30	62,5	-	7,07	25,0	95	6,19	4,5	-2,4	93	6,90	4,0	-4,8	97	7,10	4,0	-2,0	94	6,45	4,7	0,8
35	-	1,0	5,55	26,4	80	4,81	22,2	30,2	77	4,50	23,9	32,6	75	4,44	24,5	34,0	75	4,23	24,7	34,9
35	-	-	5,84	26,2	38	2,18	79,0	81,4	17	0,99	88,0	89,4	11	0,62	89,9	91,2	10	0,55	90,3	91,5

\*Dosagem da solução de HCl preparada a 0,5%; \*\* Foi levada em conta a remoção da fração de flocos flotando com velocidade menor que a considerada.

TABELA 1 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático em função da variação da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação. Dosagens de sulfato de alumínio - DSA- testadas: 10, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 e 70 mg/L; pH de coagulação: entre 5,5 e 7,5; velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; pressão de saturação: 441 kPa; fração de recirculação: 8% (em volume). Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT, temperatura: 25,6 ± 1,6 °C.

DSA (mg/L)	Dosagem de barrilha (mg/L)	Dosagem de ácido clorídrico (mL/L)*	pH após mistura rápida	Temperatura após mistura rápida (°C)	Vf1= 31,6 cm/min				Vf2= 13,3 cm/min				Vf3= 6,7 cm/min				Vf4= 2,9 cm/min			
					Remanescente		Remoção (%)**		Remanescente		Remoção (%)**		Remanescente		Remoção (%)**		Remanescente		Remoção (%)**	
					Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez
35	12,5	-	6,17	26,1	66	4,56	73,2	72,6	15	0,87	92,4	92,3	6	0,37	94,9	94,1	5	0,39	95,1	94,0
35	25,0	-	6,28	26,0	137	9,55	14,1	13,2	91	5,94	54,5	57,8	34	2,03	71,9	76,6	26	1,32	74,2	79,7
35	37,5	-	6,72	26,4	78	4,16	22,4	37,6	77	4,02	23,1	38,3	76	4,11	23,5	39,2	76	3,89	23,7	40,2
40	-	-	6,00	26,2	92	7,00	8,8	-3,6	95	6,80	13,3	0,0	80	6,56	15,3	2,7	85	6,23	14,0	4,1
40	12,5	-	6,26	26,3	41	3,07	83,8	80,7	8	0,63	95,6	93,2	3	0,42	97,1	94,4	3	0,35	97,3	94,7
40	16,25	-	6,46	24,3	85	6,64	66,6	61,9	15	0,90	90,3	89,3	8	0,79	92,4	91,4	7	0,46	92,7	92,9
40	20,0	-	6,53	25,8	117	8,63	54,8	50,9	21	1,34	88,1	88,7	9	0,59	91,3	92,3	8	0,46	91,5	92,9
40	50,0	-	6,80	25,8	131	8,89	39,7	37,5	46	3,06	79,9	78,0	13	1,05	89,5	87,3	9	0,73	90,8	88,7
40	62,5	-	7,05	25,9	110	7,29	-8,6	-13,0	109	7,53	-6,2	-11,7	107	7,26	-3,6	-9,8	101	7,08	-1,8	-9,0
45	-	-	5,79	24,9	101	7,59	2,5	-4,2	96	6,70	5,7	3,6	93	6,21	6,9	6,5	92	6,03	7,2	7,3
45	12,5	-	6,13	24,3	58	4,10	74,8	73,2	15	0,92	90,5	89,5	8	0,66	92,8	91,1	7	0,55	93,2	91,5
45	18,8	-	6,29	25,8	59	4,30	76,0	75,1	12	0,65	92,7	93,1	6	0,39	94,4	94,1	6	0,38	94,4	94,2
45	25,0	-	6,43	25,1	114	8,12	55,6	52,6	21	1,46	88,2	88,7	10	0,54	92,2	92,6	7	0,45	93,2	93,0
45	37,5	-	6,60	24,2	113	8,97	20,7	17,7	73	4,58	40,8	47,8	55	3,09	46,0	54,5	53	2,91	46,5	55,3
45	50,0	-	7,03	26,4	80	4,18	17,5	34,0	83	4,42	17,2	34,2	82	4,27	17,7	35,2	81	4,19	17,9	35,5
50	-	-	5,64	26,1	101	6,84	-1,6	-5,7	98	6,70	-3,2	-7,8	106	7,00	-3,4	-10,3	101	7,24	-1,8	-11,3
50	12,5	-	6,01	26,2	36	2,35	82,8	83,6	12	0,66	92,3	92,9	7	0,40	93,9	94,0	6	0,39	94,2	94,0
50	25,0	-	6,22	26,1	39	2,73	84,5	80,3	7	0,87	95,6	91,4	4	0,53	96,8	93,6	3	0,37	97,1	94,4
50	50,0	-	6,65	26,3	124	8,60	56,6	52,1	13	1,14	92,3	89,2	6	0,56	94,4	91,5	5	0,55	94,7	91,5

\*Dosagem da solução de HCl preparada a 0,5%; \*\* Foi levada em conta a remoção da fração de flocos flotando com velocidade menor que a considerada.

TABELA 1 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático em função da variação da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação. Dosagens de sulfato de alumínio - DSA- testadas: 10, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 e 70 mg/L; pH de coagulação: entre 5,5 e 7,5; velocidade de flotação: Vf1= 31,6 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min, Vf3= 6,7 cm/min, Vf4= 2,9 cm/min; pressão de saturação: 441 kPa; fração de recirculação: 8% (em volume). Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT, temperatura: 25,6 ± 1,6 °C.

DSA (mg/L)	Dosagem de barrilha (mg/L)	Dosagem de ácido clorídrico (mL/L)*	pH após mistura rápida	Temperatura após mistura rápida (°C)	Vf1= 31,6 cm/min				Vf2= 13,3 cm/min				Vf3= 6,7 cm/min				Vf4= 2,9 cm/min			
					Remanescente		Remoção (%)**		Remanescente		Remoção (%)**		Remanescente		Remoção (%)**		Remanescente		Remoção (%)**	
					Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez
50	62,5	-	7,04	24,9	127	9,49	28,3	17,0	70	5,13	66,6	57,5	24	2,28	80,5	71,8	18	1,65	82,3	74,6
50	75,0	-	7,33	26,6	99	7,70	-1,6	-12,3	102	7,29	-1,7	-8,2	102	7,14	-0,2	-5,4	98	6,74	1,1	-3,7
55	-	-	5,84	24,0	98	7,66	5,1	-2,9	94	6,43	7,9	4,5	92	6,19	9,5	6,1	89	6,07	10,3	6,6
55	12,5	-	5,97	26,6	37	2,37	77,4	80,6	19	0,90	85,7	88,5	13	0,70	87,7	89,2	12	0,70	88,1	89,2
55	25,0	-	6,23	26,3	81	5,15	68,7	70,1	14	0,78	91,6	91,7	7	0,51	93,5	93,3	6	0,41	93,7	93,7
55	37,5	-	6,48	26,4	145	9,13	44,8	48,6	25	1,41	86,4	89,5	10	0,48	90,4	93,4	9	0,41	90,8	93,7
55	42,5	-	6,61	26,6	109	6,47	45,4	53,0	43	2,38	75,9	82,0	19	0,91	82,8	89,1	16	0,63	83,5	90,4
55	50,0	-	6,75	26,2	109	8,45	-7,6	-22,8	108	8,20	-4,7	-15,6	103	7,45	-3,3	-11,0	102	7,12	-3,0	-9,5
60	12,5	-	5,96	26,0	110	7,97	26,0	23,7	64	4,23	45,1	47,8	53	3,36	49,5	53,9	49	2,85	50,9	56,1
60	25,0	-	6,23	25,1	27	2,12	87,3	84,4	7	0,58	93,8	91,6	6	0,57	94,6	92,0	5	0,50	94,9	92,4
60	50,0	-	6,62	25,2	139	9,45	43,2	39,0	34	2,33	84,9	79,8	10	1,31	91,5	87,5	8	0,62	92,0	90,5
60	75,0	-	6,91	25,9	103	7,92	-4,9	-22,5	103	8,05	-6,4	-22,1	109	7,92	-6,1	-21,4	104	7,88	-4,7	-21,3
60	100,0	-	7,45	26,2	97	7,05	1,7	-6,6	100	6,99	2,9	-4,7	98	6,64	5,8	-4,6	91	6,86	7,9	-5,5
70	12,5	-	5,71	27,1	73	6,91	16,9	-3,5	82	6,85	10,0	-0,3	93	6,48	8,3	1,9	90	6,34	9,3	2,5
70	25,0	-	6,17	25,3	35	2,55	83,4	81,1	10	0,73	91,7	89,8	8	0,65	92,3	90,1	7	0,64	92,5	90,2
70	45,0	-	6,46	24,6	119	9,30	54,5	45,8	19	1,41	87,3	84,7	12	0,86	90,2	86,8	9	0,85	91,3	86,9
70	42,5	-	6,52	24,6	124	10,4	56,1	44,2	14	1,22	91,7	91,0	7	0,41	94,3	94,4	5	0,35	94,9	94,7
70	62,5	-	6,65	27,2	179	13,5	26,5	17,2	45	3,08	81,1	78,8	13	1,00	91,2	88,8	7	0,62	92,7	90,5
70	75,0	-	6,94	26,9	131	8,92	2,8	-0,3	110	7,67	36,7	37,2	52	3,29	54,9	58,4	42	2,47	58,0	62,0

\*Dosagem da solução de HCl preparada a 0,5%; \*\* Foi levada em conta a remoção da fração de flocos flotando com velocidade menor que a considerada.

TABELA 2 - Cor aparente remanescente (C/C0) e turbidez remanescente (T/T0) obtidas em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático em função da dosagem de sulfato de alumínio -DSA- e pH de coagulação. DSA: 10, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 e 70 mg/L; pH de coagulação: entre 5,5 e 7,5; velocidade de flotação: 2,9 cm/min, 6,7 cm/min, 13,3 cm/min e 31,6 cm/min; pressão de saturação: 441 kPa; fração de recirculação: 8% (em volume). Características da água de estudo: cor aparente 99 uC; turbidez: 6,5 uT, temperatura: 25,6 ± 1,6 °C.

DSA (mg/L)	pH após mistura rápida	C/C0				T/T0			
		Vf (cm/min)				Vf (cm/min)			
		2,9	6,7	13,3	31,6	2,9	6,7	13,3	31,6
10	6,02	0,72	0,82	1,01	1,02	0,68	0,78	1,00	1,06
10	6,32	0,22	0,22	0,59	1,12	0,24	0,24	0,30	1,28
10	6,50	0,20	0,24	0,49	1,23	0,27	0,31	0,52	1,38
10	6,75	0,98	1,01	1,01	1,00	0,96	0,97	0,99	1,01
10	7,05	1,13	1,14	1,16	1,17	1,14	1,15	1,14	1,21
20	5,61	0,98	1,05	1,04	1,05	1,10	1,13	1,10	1,15
20	5,98	0,09	0,11	0,19	0,69	0,09	0,10	0,15	0,69
20	6,21	0,15	0,16	0,30	0,79	0,20	0,20	0,24	0,86
20	6,57	0,20	0,22	0,43	1,18	0,17	0,20	0,55	1,01
20	6,96	1,13	1,12	1,10	1,08	1,22	1,17	1,13	1,13
20	7,20	1,04	1,04	1,06	0,97	0,95	1,06	0,97	0,94
30	5,50	1,07	0,97	1,14	0,96	2,08	2,16	2,14	1,91
30	5,84	0,17	0,18	0,25	0,59	0,14	0,16	0,21	0,56
30	6,16	0,13	0,17	0,27	0,75	0,12	0,16	0,26	0,76
30	6,49	0,10	0,11	0,26	0,85	0,09	0,10	0,32	0,89
30	7,00	0,18	0,25	0,46	0,87	0,19	0,22	0,53	1,25
30	7,07	0,96	0,98	0,95	0,96	0,99	1,09	1,06	0,95
35	5,55	0,76	0,76	0,78	0,81	0,65	0,68	0,69	0,74
35	5,84	0,10	0,11	0,17	0,38	0,08	0,09	0,15	0,34
35	6,17	0,05	0,06	0,15	0,67	0,06	0,06	0,13	0,70
35	6,28	0,26	0,34	0,93	1,39	0,20	0,31	0,91	1,47
35	6,72	0,77	0,77	0,78	0,79	0,60	0,63	0,62	0,64
40	6,00	0,86	0,82	0,97	0,93	0,96	1,01	1,05	1,08
40	6,26	0,03	0,03	0,09	0,41	0,05	0,06	0,10	0,47
40	6,46	0,07	0,08	0,15	0,86	0,07	0,12	0,14	1,02
40	6,53	0,09	0,09	0,21	1,18	0,07	0,09	0,21	1,33
40	6,80	0,09	0,14	0,46	1,33	0,11	0,16	0,47	1,37
40	7,05	1,02	1,08	1,10	1,11	1,09	1,12	1,16	1,12
45	5,79	0,93	0,94	0,98	1,03	0,93	0,96	1,03	1,17
45	6,13	0,07	0,08	0,15	0,58	0,08	0,10	0,14	0,63
45	6,29	0,06	0,06	0,12	0,60	0,06	0,06	0,10	0,66
45	6,43	0,07	0,10	0,21	1,15	0,07	0,08	0,22	1,25
45	6,60	0,54	0,56	0,74	1,15	0,45	0,48	0,70	1,38
45	7,03	0,83	0,83	0,84	0,81	0,64	0,66	0,68	0,64
50	5,64	1,02	1,08	0,99	1,03	1,11	1,08	1,03	1,05
50	6,01	0,06	0,07	0,12	0,37	0,06	0,06	0,10	0,36
50	6,22	0,03	0,04	0,08	0,40	0,06	0,08	0,13	0,42
50	6,65	0,05	0,06	0,14	1,26	0,08	0,09	0,18	1,32
50	7,04	0,18	0,24	0,71	1,29	0,25	0,35	0,79	1,46
50	7,33	0,99	1,04	1,03	1,01	1,04	1,10	1,12	1,18
55	5,84	0,90	0,93	0,95	0,99	0,93	0,95	0,99	1,18
55	5,97	0,12	0,13	0,20	0,38	0,11	0,11	0,14	0,36

TABELA 2 - Cor aparente remanescente (C/C0) e turbidez remanescente (T/T0) obtidas em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático em função da dosagem de sulfato de alumínio -DSA- e pH de coagulação. DSA: 10, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 e 70 mg/L; pH de coagulação: entre 5,5 e 7,5; velocidade de flotação: 2,9 cm/min, 6,7 cm/min, 13,3 cm/min e 31,6 cm/min; pressão de saturação: 441 kPa; fração de recirculação: 8% (em volume). Características da água de estudo: cor aparente 99 uC; turbidez: 6,5 uT, temperatura: 25,6 ± 1,6 °C.

DSA (mg/L)	pH após mistura rápida	C/C0				T/T0			
		Vf (cm/min)				Vf (cm/min)			
		2,9	6,7	13,3	31,6	2,9	6,7	13,3	31,6
55	6,23	0,06	0,07	0,14	0,82	0,06	0,08	0,12	0,79
55	6,48	0,09	0,10	0,25	1,47	0,06	0,07	0,22	1,40
55	6,61	0,17	0,19	0,43	1,11	0,10	0,14	0,37	1,00
55	6,75	1,04	1,04	1,09	1,11	1,09	1,15	1,26	1,30
60	5,96	0,49	0,54	0,65	1,12	0,44	0,52	0,65	1,23
60	6,23	0,05	0,06	0,08	0,28	0,08	0,09	0,09	0,33
60	6,62	0,08	0,10	0,34	1,41	0,09	0,20	0,36	1,45
60	6,91	1,05	1,10	1,04	1,04	1,21	1,22	1,24	1,22
60	7,45	0,93	1,00	1,01	0,98	1,06	1,02	1,08	1,08
70	5,71	0,91	0,95	0,83	0,74	0,98	1,00	1,05	1,06
70	6,17	0,08	0,08	0,10	0,36	0,10	0,10	0,11	0,39
70	6,46	0,09	0,12	0,19	1,20	0,13	0,13	0,22	1,43
70	6,52	0,05	0,07	0,14	1,26	0,05	0,06	0,19	1,61
70	6,65	0,07	0,13	0,45	1,81	0,09	0,15	0,47	2,08
70	6,94	0,42	0,53	1,11	1,33	0,38	0,51	1,18	1,37

TABELA 3 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático em função da variação da fração de recirculação e velocidade de flotação. Valores testados de fração de recirculação -R-: 2, 4, 6, 8, 10 e 12%; velocidade de flotação -Vf-: 31,6 cm/min, 13,3 cm/min, 6,7 cm/min, 4 cm/min e 2,9 cm/min; dosagem de sulfato de alumínio: 40 mg/L; pH após mistura rápida:  $6,33 \pm 0,07$ ; pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 99 uC; turbidez: 6,5 uT; temperatura:  $24,9 \pm 0,4$  °C.

Fração de recirculação (%)	DSA (mg/L)	Dosagem de barrilha (mg/L)	pH após mistura rápida	Temp. (oC)	Velocidade de flotação (cm/min)	Remanescente		Remoção (%)*	
						Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez
2	40	10,0	6,32	24,9	31,6	100	7,13	56,6	55,4
					13,3	23	1,41	83,0	84,3
					6,7	16	0,92	85,7	86,5
					4,0	15	0,90	86,4	86,9
					2,9	13	0,85	86,6	87,0
4	40	11,25	6,26	24,7	31,6	79	5,45	64,1	64,4
					13,3	23	1,40	86,4	88,1
					6,7	12	0,59	90,5	91,4
					4,0	9	0,58	91,1	91,7
					2,9	9	0,53	91,1	91,8
6	40	12,5	6,29	24,5	31,6	96	6,40	61,2	61,9
					13,3	21	1,25	88,9	90,5
					6,7	9	0,58	93,0	95,0
					4,0	8	0,50	94,2	97,3
					2,9	5	0,13	94,5	98,0
8	40	15,0	6,39	25,2	31,6	53	3,39	75,7	77,2
					13,3	15	0,89	90,0	91,0
					6,7	10	0,57	92,5	93,3
					4,0	7	0,41	93,1	93,8
					2,9	7	0,40	93,2	93,9
10	40	12,5	6,29	25,2	31,6	86	5,91	66,3	66,1
					13,3	15	0,91	90,4	91,7
					6,7	9	0,44	93,1	93,8
					4,0	6	0,41	93,7	94,0
					2,9	6	0,39	93,8	94,1
12	40	13,75	6,32	25,3	31,6	115	7,84	56,5	54,6
					13,3	17	1,27	88,3	88,4
					6,7	10	0,58	90,3	91,0
					4,0	9	0,58	90,4	91,0
					2,9	9	0,58	90,4	91,0

\* Foi levada em conta a remoção da fração de flocos flotando com velocidade menor que a considerada.

TABELA 4 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático em função da variação do gradiente de velocidade médio de mistura rápida e tempo de mistura rápida. Valores testados de gradiente de velocidade médio de mistura rápida -Gmr-: 600, 700, 800, 900, 1000 e 1100 s<sup>-1</sup>; valores testados de tempo de mistura rápida -Tmr-: 10, 20, 30 e 40 s; dosagem de sulfato de alumínio -DSA-: 40 mg/L; pH de coagulação: 6,33 ± 0,1; velocidade de flotação: Vf1= 21,8 cm/min, Vf2= 13,3 cm/min; pressão de saturação: 441 kPa; fração de recirculação: 8% (em volume). Características da água de estudo: cor aparente: 89 a 99 uC; turbidez: 6,5 a 7,8 uT; temperatura: 25,0 + 1,6 °C.

Gmr (s <sup>-1</sup> )	Tmr (s)	DSA (mg/L)	Dosagem de barrilha (mg/L)	pH após mistura rápida	Temperatura após mistura rápida (°C)	Vf1= 21,8 cm/min				Vf2= 13,3 cm/min			
						Remanescente		Remoção (%)		Remanescente		Remoção (%)	
						Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez
600	10	40	12,5	6,36	25,2	34	2,52	65,8	61,3	12	0,71	88,0	89,0
600	20	40	12,5	6,23	24,2	27	1,57	72,7	75,9	8	0,58	92,2	91,0
600	30	40	12,5	6,34	25,4	18	1,10	81,7	83,1	12	0,59	88,3	90,9
600	40	40	12,5	6,23	25,8	32	2,11	67,5	67,6	10	0,72	90,0	88,9
700	10	40	13,75	6,30	25,5	29	1,84	70,7	71,8	10	0,55	89,5	91,5
700	20	40	15,0	6,28	25,0	28	1,68	71,2	74,1	11	0,79	89,3	87,9
700	30	40	16,25	6,34	25,5	38	2,38	61,9	63,4	12	0,69	87,8	89,4
700	40	40	16,25	6,32	26,2	39	2,54	60,2	61,0	12	0,69	87,8	89,4
800	10	40	15,0	6,26	26,1	20	1,36	79,2	79,1	8	0,50	91,5	92,4
800	20	40	16,25	6,25	26,4	22	1,58	78,0	75,7	9	0,53	90,7	91,9
800	30	40	16,25	6,30	24,8	32	2,00	67,0	69,3	10	0,50	90,2	92,4
800	40	40	16,25	6,32	24,2	31	1,92	68,5	70,4	9	0,59	90,5	90,9
900	10	40	16,25	6,37	24,4	35	3,29	64,1	49,3	6	0,69	93,4	89,4
900	20	40	16,25	6,43	23,9	34	2,70	65,8	58,5	8	0,78	91,7	88,0
900	30	40	15,0	6,37	26,1	45	3,07	53,9	52,8	15	1,02	84,6	84,4
900	40	40	12,5	6,37	25,6	27	2,06	72,4	68,3	10	0,63	89,7	90,4
1000	10	40	15,0	6,36	23,9	10	0,94	90,2	85,5	6	0,41	94,1	93,7
1000	20	40	15,0	6,25	25,8	11	1,13	89,0	82,6	5	0,37	95,1	94,4
1000	30	40	15,0	6,24	23,8	16	1,35	84,1	79,2	6	0,41	93,7	93,7
1000	40	40	16,25	6,38	23,7	13	0,78	86,3	88,0	4	0,37	95,6	94,4
1100	10	40	16,25	6,40	25,1	11	0,67	88,5	89,7	6	0,46	93,9	92,9
1100	20	40	16,25	6,38	23,4	26	2,29	73,4	64,8	11	0,79	89,3	87,9
1100	30	40	16,25	6,39	24,0	40	2,80	59,7	57,0	9	0,85	90,5	86,9
1100	40	40	16,25	6,40	24,6	42	2,98	57,3	54,1	10	0,73	89,7	88,7

TABELA 5 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático em função da variação do tempo de floculação e gradiente de velocidade médio de floculação. Valores testados de tempo de floculação -Tf-: 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 30 min; valores testados de gradiente de velocidade médio de floculação -Gf-: 20, 40, 60, 80, 100, 120 140, 160 e 180 s<sup>-1</sup>; dosagem de sulfato de alumínio -DSA-: 40 mg/L; pH de coagulação: 6,36 ± 0,13; velocidade de flotação: Vf1= 21,0 cm/min, Vf2= 10,4 cm/min; pressão de saturação: 441 kPa; fração de recirculação: 8% (em volume). Características da água de estudo: cor aparente: 84 a 98 uC; turbidez: 6,06 a 7,87 uT; temperatura: 25,0 + 1,4 °C.

Tf (s)	Gf (s <sup>-1</sup> )	DSA (mg/L)	Dosagem de barrilha (mg/L)	pH após mistura rápida	Temperatura após mistura rápida (°C)	Vf1= 21,0 cm/min				Vf2= 10,4 cm/min			
						Remanescente		Remoção (%)		Remanescente		Remoção (%)	
						Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez
2	20	40	7,5	6,44	24,9	66	4,73	28,3	21,9	41	2,56	55,3	57,8
2	40	40	6,25	6,31	25,3	31	2,01	66,8	66,9	19	1,20	79,9	80,2
2	60	40	6,25	6,24	25,4	46	2,86	49,5	52,8	26	1,67	71,8	72,4
2	80	40	7,5	6,31	23,6	39	2,84	57,6	53,1	24	1,32	74,1	78,3
2	100	40	11,3	6,32	24,5	30	2,06	67,3	66,0	14	0,92	84,3	84,9
2	120	40	8,75	6,33	26,3	19	1,12	79,3	81,5	11	0,55	88,0	90,9
2	140	40	8,75	6,34	24,7	21	1,30	77,5	78,6	12	0,56	87,4	90,7
2	160	40	8,75	6,34	26,4	16	0,98	82,5	83,8	9	0,41	90,6	93,2
2	180	40	8,75	6,38	25,3	18	1,11	80,1	81,6	12	0,51	87,2	91,6
4	20	40	7,5	6,31	24,0	49	3,35	46,4	44,8	29	1,75	68,1	71,1
4	40	40	7,5	6,33	24,3	36	2,27	60,8	62,6	18	1,74	80,4	71,3
4	60	40	7,5	6,25	23,6	27	1,64	71,0	72,9	14	0,81	84,3	86,6
4	80	40	7,5	6,27	24,8	17	0,98	82,0	83,8	10	0,58	88,8	90,4
4	100	40	11,3	6,36	24,6	25	1,83	73,1	69,9	13	0,81	86,1	86,6
8	20	40	8,75	6,36	25,0	30	1,92	67,8	68,3	13	0,70	86,1	88,4
8	40	40	8,75	6,43	24,9	21	1,54	77,5	74,5	9	0,55	90,3	90,9
8	60	40	8,75	6,33	25,7	16	1,04	83,0	82,9	6	0,53	93,2	91,3
8	80	40	8,75	6,38	26,1	13	1,04	86,4	82,9	6	0,52	93,2	91,4
8	100	40	11,3	6,35	24,7	16	1,32	82,2	78,3	6	0,48	93,7	92,2
12	20	40	7,5	6,39	25,7	26	1,41	72,0	76,7	13	0,56	86,1	90,7
12	40	40	7,5	6,40	24,7	24	1,46	73,6	75,9	8	0,48	90,8	92,2
12	60	40	7,5	6,38	24,5	20	1,31	78,3	78,4	7	0,63	91,9	89,7
12	80	40	7,5	6,40	25,2	11	0,85	88,5	85,9	6	0,38	92,9	93,8
12	100	40	11,3	6,36	25,1	13	1,00	85,6	83,4	5	0,56	94,2	90,7
16	20	40	5,5	6,47	23,9	28	1,95	69,1	67,7	13	0,73	86,1	87,9
16	40	40	5,0	6,37	24,8	13	1,00	85,4	83,4	7	0,40	92,7	93,4
16	60	40	5,0	6,36	24,8	18	1,32	80,9	78,3	7	0,48	91,9	92,2
16	80	40	5,0	6,37	24,2	11	0,77	88,0	87,3	6	0,30	94,0	95,0
16	100	40	11,3	6,36	24,3	15	1,05	83,5	82,7	5	0,46	94,8	92,3
20	20	40	8,75	6,37	24,7	16	1,16	80,8	85,1	7	0,51	92,0	93,5
20	40	40	8,75	6,34	25,5	16	1,08	81,4	86,1	6	0,38	93,1	95,1
20	60	40	8,75	6,40	25,1	8	0,66	90,2	91,5	4	0,25	95,4	96,8
20	80	40	8,75	6,41	25,2	10	0,78	88,5	90,0	4	0,29	95,4	96,2
20	100	40	8,75	6,38	25,3	9	0,84	89,1	89,1	3	0,24	96,8	96,9

TABELA 5 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático em função da variação do tempo de floculação e gradiente de velocidade médio de floculação. Valores testados de tempo de floculação -Tf-: 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 30 min; valores testados de gradiente de velocidade médio de floculação -Gf-: 20, 40, 60, 80, 100, 120 140, 160 e 180 s<sup>-1</sup>; dosagem de sulfato de alumínio -DSA-: 40 mg/L; pH de coagulação: 6,36 ± 0,13; velocidade de flotação: Vf1= 21,0 cm/min, Vf2= 10,4 cm/min; pressão de saturação: 441 kPa; fração de recirculação: 8% (em volume). Características da água de estudo: cor aparente: 84 a 98 uC; turbidez: 6.06 a 7.87 uT; temperatura: 25,0 + 1,4 °C.

Tf (s)	Gf (s <sup>-1</sup> )	DSA (mg/L)	Dosagem de barrilha (mg/L)	pH após mistura rápida	Temperatura após mistura rápida (°C)	Vf1= 21,0 cm/min				Vf2= 10,4 cm/min			
						Remanescente		Remoção (%)		Remanescente		Remoção (%)	
						Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez
24	20	40	-	6,27	24,8	27	1,73	71,0	71,5	15	0,89	83,3	85,4
24	40	40	7	6,49	24,9	15	1,06	84,0	82,5	5	0,33	94,2	94,5
24	60	40	2,5	6,40	24,8	8	0,57	91,4	90,6	5	0,37	94,8	93,9
24	80	40	5,0	6,39	24,8	8	0,60	90,8	90,0	6	0,33	93,5	94,5
24	100	40	11,3	6,38	25,2	16	1,60	83,0	73,6	4	0,46	95,6	92,3
30	20	40	11,3	6,34	24,8	28	2,21	69,8	71,9	10	0,94	89,4	88,1
30	40	40	11,3	6,32	25,9	11	1,06	87,9	86,6	5	0,39	94,8	95,1
30	60	40	11,3	6,36	24,6	16	2,06	82,9	73,8	3	0,32	96,6	95,9
30	80	40	11,3	6,36	24,1	13	1,34	85,8	83,0	4	0,39	95,9	95,1
30	100	40	11,3	6,34	24,2	18	1,67	80,9	78,7	6	0,54	93,8	93,1

TABELA 6 - Resultados obtidos, em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático, em função da variação do escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação para tempo de floculação de 24 e 12 min. Origem dos valores testados de escalonamentos do gradiente de velocidade médio de floculação -Gf-: \*metodologia proposta por PÁDUA (1994), \*\*aleatório relativamente alto, \*\*\*aleatório relativamente baixo; dosagem de sulfato de alumínio -DSA-: 40 mg/L; pH de coagulação:  $6,37 \pm 0,10$ ; velocidade de flotação: Vf1= 21,0 cm/min, Vf2= 10,4 cm/min; pressão de saturação: 441 kPa; fração de recirculação: 8% (em volume). Características da água de estudo: cor aparente: 78 a 95 uC; turbidez: 5,66 a 6,25 uT; temperatura:  $25,2 \pm 0,8$  °C.

Tf (s)	Escalaonamento do Gf (s <sup>-1</sup> )	DSA (mg/L)	Dosagem de barrilha (mg/L)	pH após mistura rápida	Temperatura após mistura rápida (°C)	Vf1= 21,0 cm/min				Vf2= 10,4 cm/min			
						Remanescente		Remoção (%)		Remanescente		Remoção (%)	
						Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez
24	120-100-80**	40	8,75	6,43	25,4	14	1,33	84,7	77,6	4	0,65	95,7	89,1
24	100-80-60*	40	17,5	6,31	24,8	19	1,49	79,6	73,7	5	0,43	94,4	92,4
24	100-60-60*	40	17,5	6,30	24,6	22	1,50	77,3	73,5	6	0,30	93,9	94,7
24	80-60-60*	40	10,0	6,40	25,1	14	1,11	84,4	81,2	4	0,38	96,0	93,6
24	80-60-40	40	15,0	6,35	25,8	23	2,02	70,2	67,7	9	0,54	88,5	91,4
24	60-40-20***	40	8,75	6,36	25,9	29	2,07	67,2	65,0	8	0,64	90,6	89,2
24	100-100*	40	20,0	6,27	24,4	11	0,79	88,4	86,1	4	0,31	95,7	94,5
24	100-80**	40	8,75	6,38	25,2	18	1,40	80,1	76,3	3	0,28	97,0	95,3
24	80-60*	40	8,75	6,33	25,7	9	0,77	89,8	87,0	3	0,31	96,5	94,7
24	60-40***	40	8,75	6,34	25,4	20	1,61	77,2	72,8	3	0,32	96,8	94,5
24	80	40	10,0	6,47	24,8	11	1,05	87,4	82,3	3	0,37	96,5	93,8
24	60	40	8,75	6,42	25,4	12	0,99	86,8	83,2	3	0,24	97,0	96,0
12	120-100-80**	40	8,75	6,34	25,0	15	1,21	83,1	79,6	4	0,36	95,4	94,0
12	80-80-60*	40	8,75	6,35	25,3	22	1,58	75,8	73,4	6	0,49	93,0	91,8
12	80-60-60*	40	8,75	6,44	25,0	22	1,70	75,3	71,4	7	0,53	92,2	91,1
12	80-40-40*	40	8,75	6,37	25,1	20	1,59	77,2	73,2	5	0,36	94,4	94,0
12	60-40-20***	40	8,75	6,40	25,2	19	2,00	78,5	66,3	13	0,46	86,0	92,2
12	100-80**	40	8,75	6,35	25,4	21	1,64	76,1	72,3	7	0,50	92,5	91,6
12	80-60*	40	8,75	6,35	25,0	13	1,05	85,5	82,3	4	0,53	95,2	91,1
12	60-40***	40	7,5	6,38	25,0	19	1,27	79,3	78,5	7	0,49	91,7	91,8
12	80	40	8,75	6,34	25,4	17	1,26	80,7	78,7	4	0,35	95,4	94,2

## **Apêndice 2a**

Resumo com as características gerais de cada carreira de operação realizada na instalação com escoamento contínuo para a água tipo I

## Características gerais da carreira de operação 1: ensaios B1, B2 e B3

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,16	6,91	-
Temperatura (°C)	27,6	27,2	-
Cor aparente (uC)	1	100	-
Cor verdadeira (uC)	-	58	-
Turbidez (uT)	0,34	5,70	9,78 ± 1,03
Condutividade (µmho/cm)	52,1	55,7	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	26	26	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	18	17	-
SST (mg/L)	-	5,5	30,0
SSF (mg/L)	-	3,5	22,7
SSV (mg/L)	-	2,0	7,3

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3	jarro 4	
Dos. barrilha (mg/L)	12,5	10	11,25	13,75	
pH de coagulação	6,32	6,25	6,32	6,39	
Temperatura (°C)	25,3	26,5	25,7	26,3	
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	24	17	17	10
	Vf=10,4 cm/min	7	3	3	2
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	1,71	1,36	1,27	0,80
	Vf=10,4 cm/min	0,62	0,46	0,42	0,30

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,38 ± 0,09
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,25
Vazão da solução de sulfato (L/h)	9,1
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	12
Concentração da solução de barrilha (%)	0,12
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	5,5
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,74 ± 0,14

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio B1	Ensaio B2	Ensaio B3
Nº de câmaras de floc.	2	2	2
Tempo teórico de floc.(min)	24	24	24
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	100	80	60
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	60	40
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-	-
Vazão afl. água estudo (L/h)	565	565	565
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	359	359	359
Vplacas (cm/min)	31	31	31
Reynolds entre as placas	368	368	368

## Características gerais da carreira de operação 2: ensaios G1 e G2

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,79	6,76	-
Temperatura (°C)	26,5	26,5	-
Cor aparente (uC)	2	85	-
Cor verdadeira (uC)	-	42	-
Turbidez (uT)	0,42	5,51	8 ± 0,21
Condutividade (µmho/cm)	51,2	60,1	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	24	26	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	16	19	-
SST (mg/L)	-	5,3	26,5
SSF (mg/L)	-	4,0	19,0
SSV (mg/L)	-	1,3	7,5

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P<sub>z</sub> ≈ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3	jarro 4	
Dos. barrilha (mg/L)	12,5	11,25	8,75	6,25	
pH de coagulação	6,51	6,49	6,45	6,39	
Temperatura (°C)	26,7	26,8	27	26,3	
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	28	28	32	15
	Vf=10,4 cm/min	6	5	8	5
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	1,90	2,18	2,72	1,36
	Vf=10,4 cm/min	0,42	0,59	0,63	0,46

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,42 ± 0,08
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,25
Vazão da solução de sulfato (L/h)	18,0
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	18
Concentração da solução de barrilha (%)	0,12
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	16,6
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,77 ± 0,06

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio G1	Ensaio G2
Nº de câmaras de floc.	2	2
Tempo teórico de floc.(min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	60	80
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Vazão afl. água estudo (L/h)	1130	1130
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	720	720
Vplacas (cm/min)	63	63
Reynolds entre as placas	738	738

## Características gerais da carreira de operação 3: ensaio B4

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,41	6,97	-
Temperatura (°C)	26,2	26,8	-
Cor aparente (uC)	14	122	-
Cor verdadeira (uC)	-	55	-
Turbidez (uT)	1,09	7,56	11,3
Condutividade (µmho/cm)	58,4	60,8	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	30	31	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	22	23	-
SST (mg/L)	-	6,5	24,0
SSF (mg/L)	-	5,5	19,0
SSV (mg/L)	-	1,0	5,0

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3	jarro 4
Dos. barrilha (mg/L)	10	7,5	5	0
pH de coagulação	6,57	6,44	6,44	6,25
Temperatura (°C)	26,8	26,3	26,5	26
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	15	20	29
	Vf=10,4 cm/min	6	6	6
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	1,31	1,67	2,05
	Vf=10,4 cm/min	0,48	0,50	0,54

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,27 ± 0,03
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,25
Vazão da solução de sulfato (L/h)	9,0
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	6
Concentração da solução de barrilha (%)	0,12
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	2,9
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,74 ± 0,09

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio B4
Nº de câmaras de floc.	2
Tempo teórico de floc. (min)	24
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	60
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	60
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-
Vazão afl. água estudo (L/h)	565
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	357
Vplacas (cm/min)	31
Reynolds entre as placas	366

## Características gerais da carreira de operação 4: ensaios J2 e E1

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	5,70	6,56	-
Temperatura (°C)	27,1	27,3	-
Cor aparente (uC)	3	111	-
Cor verdadeira (uC)	-	57	-
Turbidez (uT)	0,15	6,60	8,56 ± 0,76
Condutividade (µmho/cm)	48,7	54,5	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	26	28	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	17	18	-
SST (mg/L)	-	6,0	22,0
SSF (mg/L)	-	4,0	16,0
SSV (mg/L)	-	2,0	6,0

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3
Dos. barrilha (mg/L)	20	22,5	25
pH de coagulação	6,27	6,3	6,34
Temperatura (°C)	26	25,6	26
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	122	149
	Vf=10,4 cm/min	13	17
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	8,15	9,87
	Vf=10,4 cm/min	0,78	0,90

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,28 ± 0,06
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,25
Vazão da solução de sulfato (L/h)	13,7 (Ensaio J2) e 9 (Ensaio E1)
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	23 (Ensaio J2) e 20 (Ensaio E1)
Concentração da solução de barrilha (%)	0,12
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	16,2 (Ensaio J2) e 9,4 (Ensaio E1)
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,73 ± 0,13

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio J2	Ensaio E1
Nº de câmaras de floc.	1	1
Tempo teórico de floc.(min)	8	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Vazão afl. água estudo (L/h)	850	565
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	543	368
Vplacas (cm/min)	47	32
Reynolds entre as placas	556	377

## Características gerais da carreira de operação 5: ensaios C1 e H1

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,17	7,05	-
Temperatura (°C)	27,1	27,9	-
Cor aparente (uC)	5	104	-
Cor verdadeira (uC)	-	57	-
Turbidez (uT)	0,50	5,96	7,37 ± 0,63
Condutividade (µmho/cm)	52,1	52,1	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	25	27	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	17	20	-
SST (mg/L)	-	4,8	24,0
SSF (mg/L)	-	3,2	18,0
SSV (mg/L)	-	1,5	6,0

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3	jarro 4	
Dos. barrilha (mg/L)	12,5	10	11,25	8,75	
pH de coagulação	6,40	6,30	6,34	6,25	
Temperatura (°C)	27,1	26,9	26,4	26,2	
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	57	26	36	31
	Vf=10,4 cm/min	13	7	7	7
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	3,69	1,80	2,32	2,15
	Vf=10,4 cm/min	0,76	0,43	0,43	0,38

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,29 ± 0,09
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,25
Vazão da solução de sulfato (L/h)	4,5 (Ensaio C1) e 8,9 (Ensaio H1)
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	8
Concentração da solução de barrilha (%)	0,12
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	1,8 (Ensaio C1) e 3,4 (Ensaio H1)
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,88 ± 0,27

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio C1	Ensaio H1
Nº de câmaras de floc.	1	1
Tempo teórico de floc. (min)	24	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	60	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Vazão afl. água estudo (L/h)	283	565
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	357	708
Vplacas (cm/min)	31	62
Reynolds entre as placas	366	726

## Características gerais da carreira de operação 6: ensaio L1

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,10	6,91	-
Temperatura (°C)	26,2	27,3	-
Cor aparente (uC)	3	92	-
Cor verdadeira (uC)	-	49	-
Turbidez (uT)	0,16	5,64	9,51
Condutividade (µmho/cm)	50,7	51,4	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	24	25	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	16	18	-
SST (mg/L)	-	4,5	34,0
SSF (mg/L)	-	3,0	24,0
SSV (mg/L)	-	1,5	10,0

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3	jarro 4
Dos. barrilha (mg/L)	12,5	10	11,25	8,75
pH de coagulação	6,46	6,33	6,41	6,28
Temperatura (°C)	26,3	26,8	26,5	26,6
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	22	24	12
	Vf=10,4 cm/min	6	5	3
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	1,75	1,67	0,99
	Vf=10,4 cm/min	0,36	0,30	0,29

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,4 ± 0,07
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,25
Vazão da solução de sulfato (L/h)	27,4
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	31
Concentração da solução de barrilha (%)	0,22
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	24,1
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,73 ± 0,04

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio L1
Nº de câmaras de floc.	1
Tempo teórico de floc. (min)	4
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-
Vazão afl. água estudo (L/h)	1700
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	720
Vplacas (cm/min)	63
Reynolds entre as placas	738

## Características gerais da carreira de operação 7: ensaios J1, A2 e A1

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH		7,03	-
Temperatura (°C)		27,4	-
Cor aparente (uC)	Amostra não coletada	106	-
Cor verdadeira (uC)		56	-
Turbidez (uT)		6,30	9,89 ± 1,12
Condutividade (µmho/cm)		50,7	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )		25	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )		18	-
SST (mg/L)		5,3	32,0
SSF (mg/L)		2,0	24,3
SSV (mg/L)		3,2	7,7

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3	jarro 4	
Dos. barrilha (mg/L)	10	11,25	8,75	12,5	
pH de coagulação	6,31	6,36	6,29	6,43	
Temperatura (°C)	26,6	26,4	27,4	26,3	
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	16	22	10	27
	Vf=10,4 cm/min	7	5	3	4
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	0,94	1,38	0,72	1,98
	Vf=10,4 cm/min	0,38	0,38	0,33	0,32

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,3 ± 0,04
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,25
Vazão da solução de sulfato (L/h)	13,7
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	10
Concentração da solução de barrilha (%)	0,12
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	6,8
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,79 ± 0,09

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio J1	Ensaio A2	Ensaio A1
Nº de câmaras de floc.	1	3	3
Tempo teórico de floc. (min)	8	24	24
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	60	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	60	60
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	60	60
Vazão afl. água estudo (L/h)	850	850	850
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	358	358	358
Vplacas (cm/min)	31	31	31
Reynolds entre as placas	367	367	367

## Características gerais da carreira de operação 8: ensaios F1 e F2

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada	
pH		6,84	-	
Temperatura (°C)		27,6	-	
Cor aparente (uC)	Amostra não coletada	102	-	
Cor verdadeira (uC)		58	-	
Turbidez (uT)		6,00	8,58 ± 0,3	
Condutividade (µmho/cm)		50,7	-	
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )		23	-	
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )		18	-	
SST (mg/L)		4,8	24,0	
SSF (mg/L)		1,3	20,0	
SSV (mg/L)			3,5	4,0

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3	jarro 4	
Dos. barrilha (mg/L)	12,5	10	8,75	11,25	
pH de coagulação	6,45	6,33	6,27	6,4	
Temperatura (°C)	27,2	26,9	27	26,9	
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	41	20	16	25
	Vf=10,4 cm/min	8	4	4	6
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	2,89	1,54	1,12	1,85
	Vf=10,4 cm/min	0,56	0,29	0,35	0,48

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,29 ± 0,02
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,50
Vazão da solução de sulfato (L/h)	13,7
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	20
Concentração da solução de barrilha (%)	0,24
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	14,4
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,82 ± 0,07

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio F1	Ensaio F2
Nº de câmaras de floc.	3	3
Tempo teórico de floc.(min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	120
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	40	100
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	40	80
Vazão afl. água estudo (L/h)	1700	1700
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	711	711
Vplacas (cm/min)	62	62
Reynolds entre as placas	729	729

## Características gerais da carreira de operação 9: ensaios F3 e F4

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,04	6,77	-
Temperatura (°C)	26,6	28,0	-
Cor aparente (uC)	2	108	-
Cor verdadeira (uC)	-	58	-
Turbidez (uT)	0,21	5,60	8,56 ± 0,02
Condutividade (µmho/cm)	50,3	55,7	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	23	25	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	17	17	-
SST (mg/L)	-	4,0	20,5
SSF (mg/L)	-	2,8	17,0
SSV (mg/L)	-	1,3	3,5

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3	jarro 4
Dos. barrilha (mg/L)	12,5	10	8,75	7,5
pH de coagulação	6,53	6,44	6,38	6,28
Temperatura (°C)	26,2	27,2	26,8	27,3
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	28	22	20
	Vf=10,4 cm/min	9	6	6
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	1,77	1,38	1,32
	Vf=10,4 cm/min	0,53	0,37	0,44

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,28 ± 0,03
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,50
Vazão da solução de sulfato (L/h)	13,7
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	17
Concentração da solução de barrilha (%)	0,24
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	11,9
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,81 ± 0,1

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio F3	Ensaio F4
Nº de câmaras de floc.	3	3
Tempo teórico de floc.(min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	60	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	40	80
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	20	80
Vazão afl. água estudo (L/h)	1700	1700
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	710	710
Vplacas (cm/min)	62	62
Reynolds entre as placas	728	728

Características gerais da carreira de operação 10: ensaios A3, A4 e A2

a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,55	7,35	-
Temperatura (°C)	27,8	28,0	-
Cor aparente (uC)	5	105	-
Cor verdadeira (uC)	-	60	-
Turbidez (uT)	0,42	6,08	9,47 ± 0,93
Condutividade (µmho/cm)	51,8	54,5	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	26	28	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	20	18	-
SST (mg/L)	-	4,2	27,3
SSF (mg/L)	-	3,0	20,1
SSV (mg/L)	-	1,2	7,1

b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3	jarro 4
Dos. barrilha (mg/L)	10	8,75	7,5	6,25
pH de coagulação	6,42	6,36	6,3	6,27
Temperatura (°C)	27,9	27,9	27,7	27,6
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	22	19	18
	Vf=10,4 cm/min	7	7	6
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	1,23	1,04	0,95
	Vf=10,4 cm/min	0,32	0,27	0,26

c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,31 ± 0,08
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,25
Vazão da solução de sulfato (L/h)	13,3
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	7
Concentração da solução de barrilha (%)	0,12
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	4,9
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,8 ± 0,08

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio A3	Ensaio A4	Ensaio A2
Nº de câmaras de floc.	3	3	3
Tempo teórico de floc.(min)	24	24	24
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	120	60	60
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	100	40	60
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	20	60
Vazão afl. água estudo (L/h)	850	850	850
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	357	357	357
Vplacas (cm/min)	31	31	31
Reynolds entre as placas	366	366	366

## Características gerais da carreira de operação 11: ensaios D1 e D2

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,43	6,87	-
Temperatura (°C)	26,0	27,0	-
Cor aparente (uC)	8	105	-
Cor verdadeira (uC)	-	64	-
Turbidez (uT)	0,55	6,03	10,8 ± 1,02
Condutividade (µmho/cm)	49,7	51,8	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	27	25	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	18	17	-
SST (mg/L)	-	5,4	33,0
SSF (mg/L)	-	4,3	26,0
SSV (mg/L)	-	1,1	7,0

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P ≈ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3	jarro 4
Dos. barrilha (mg/L)	10	6,25	7,5	11,25
pH de coagulação	6,37	6,27	6,31	6,4
Temperatura (°C)	27,2	26,7	26,8	27
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	25	14	19
	Vf=10,4 cm/min	7	6	6
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	1,62	0,90	1,02
	Vf=10,4 cm/min	0,35	0,30	0,29

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,33 ± 0,08
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,25
Vazão da solução de sulfato (L/h)	17,6
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	17
Concentração da solução de barrilha (%)	0,12
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	16,2
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,73 ± 0,05

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio D1	Ensaio D2
Nº de câmaras de floc.	2	2
Tempo teórico de floc.(min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	100	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	60
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Vazão afl. água estudo (L/h)	1130	1130
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	360	360
Vplacas (cm/min)	31	31
Reynolds entre as placas	369	369

## Características gerais da carreira de operação 12: ensaios D3 e D4

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,53	7,25	-
Temperatura (°C)	26,3	26,5	-
Cor aparente (uC)	7	111	-
Cor verdadeira (uC)	-	66	-
Turbidez (uT)	0,53	6,43	10,8 ± 0,75
Condutividade (µmho/cm)	50,7	52,1	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	26	26	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	19	18	-
SST (mg/L)	-	6,3	32,0
SSF (mg/L)	-	6,0	26,0
SSV (mg/L)	-	0,3	6,0

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P<sub>z</sub>: 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3	jarro 4
Dos. barrilha (mg/L)	10	7,5	5	2,5
pH de coagulação	6,48	6,44	6,34	6,26
Temperatura (°C)	27,2	27	26,7	27
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	35	17	11
	Vf=10,4 cm/min	9	8	8
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	2,15	1,02	0,63
	Vf=10,4 cm/min	0,54	0,42	0,38

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,36 ± 0,03
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,25
Vazão da solução de sulfato (L/h)	18,0
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	11
Concentração da solução de barrilha (%)	0,12
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	10,1
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,83 ± 0,04

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio D3	Ensaio D4
Nº de câmaras de floc.	2	2
Tempo teórico de floc.(min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	60	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	40	80
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Vazão afl. água estudo (L/h)	1130	1130
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	358	358
Vplacas (cm/min)	31	31
Reynolds entre as placas	367	367

## Características gerais da carreira de operação 13: ensaio I1

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,38	6,96	-
Temperatura (°C)	26,0	27,0	-
Cor aparente (uC)	1	105	-
Cor verdadeira (uC)	-	62	-
Turbidez (uT)	0,35	6,20	11,8
Condutividade (µmho/cm)	55,3	58,9	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	23	27	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	18	19	-
SST (mg/L)	-	5,4	28,7
SSF (mg/L)	-	3,7	22,0
SSV (mg/L)	-	1,7	6,7

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3	jarro 4
Dos. barrilha (mg/L)	7,5	5	2,5	0
pH de coagulação	6,46	6,36	6,33	6,26
Temperatura (°C)	26,2	27,4	27	27,2
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	13	16	9
	Vf=10,4 cm/min	7	7	6
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	0,86	0,95	0,51
	Vf=10,4 cm/min	0,35	0,37	0,33

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,33 ± 0,09
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,50
Vazão da solução de sulfato (L/h)	13,7
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	11
Concentração da solução de barrilha (%)	0,24
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	7,6
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,82 ± 0,03

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio I1
Nº de câmaras de floc.	2
Tempo teórico de floc.(min)	8
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-
Vazão afl. água estudo (L/h)	1700
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	531
Vplacas (cm/min)	46
Reynolds entre as placas	545

## Características gerais da carreira de operação 14: ensaios D2 e D3

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,44	6,98	-
Temperatura (°C)	26,0	27,9	-
Cor aparente (uC)	7	102	-
Cor verdadeira (uC)	-	61	-
Turbidez (uT)	0,70	5,84	12,2 ± 1,45
Condutividade (µmho/cm)	57,0	56,6	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	25	25	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	18	19	-
SST (mg/L)	-	4,5	30,3
SSF (mg/L)	-	3,0	23,3
SSV (mg/L)	-	1,5	7,0

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P<sub>≅</sub> 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3	jarro 4
Dos. barrilha (mg/L)	10	7,5	5	6,25
pH de coagulação	6,45	6,36	6,25	6,29
Temperatura (°C)	28	27,5	27,4	27,7
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	25	13	16
	Vf=10,4 cm/min	5	4	3
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	1,68	0,91	1,04
	Vf=10,4 cm/min	0,46	0,41	0,29

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,4 ± 0,1
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,25
Vazão da solução de sulfato (L/h)	18,0
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	10
Concentração da solução de barrilha (%)	0,12
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	9,0
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,78 ± 0,04

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio D2	Ensaio D3
Nº de câmaras de floc.	2	2
Tempo teórico de floc. (min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	60
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	60	40
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Vazão afl. água estudo (L/h)	1130	1130
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	358	358
Vplacas (cm/min)	31	31
Reynolds entre as placas	367	367

## Características gerais da carreira de operação 15: ensaio L2

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,69	7,03	-
Temperatura (°C)	27,2	27,1	-
Cor aparente (uC)	7	105	-
Cor verdadeira (uC)	-	60	-
Turbidez (uT)	0,78	6,10	11,70
Condutividade (µmho/cm)	57,5	57,0	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	25	25	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	20	21	-
SST (mg/L)	-	4,8	28,0
SSF (mg/L)	-	3,2	19,0
SSV (mg/L)	-	1,5	9,0

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3	jarro 4	
Dos. barrilha (mg/L)	12,5	10	7,5	5	
pH de coagulação	6,5	6,46	6,4	6,34	
Temperatura (°C)	28	27,9	27,6	27,6	
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	25	14	10	15
	Vf=10,4 cm/min	8	5	5	5
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	1,70	0,87	0,67	1,04
	Vf=10,4 cm/min	0,54	0,30	0,28	0,38

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,41 ± 0,1
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,50
Vazão da solução de sulfato (L/h)	13,7
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	12
Concentração da solução de barrilha (%)	0,24
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	8,3
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,85 ± 0,02

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio L2
Nº de câmaras de floc.	1
Tempo teórico de floc.(min)	4
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-
Vazão afl. água estudo (L/h)	1700
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	531
Vplacas (cm/min)	46
Reynolds entre as placas	545

## Características gerais da carreira de operação 16: ensaio L3

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,52	7,15	-
Temperatura (°C)	26,0	27,5	-
Cor aparente (uC)	-	99	-
Cor verdadeira (uC)	-	60	-
Turbidez (uT)	0,31	5,59	12,8
Condutividade (µmho/cm)	57,9	57,0	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	26	24	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	22	22	-
SST (mg/L)	-	4,3	33,0
SSF (mg/L)	-	2,3	25,0
SSV (mg/L)	-	2,0	8,0

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3
Dos. barrilha (mg/L)	12,5	10	7,5
pH de coagulação	6,64	6,51	6,39
Temperatura (°C)	26,8	26,6	26,5
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	-	-
	Vf=10,4 cm/min	-	-
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	2,34	1,26
	Vf=10,4 cm/min	0,64	0,33

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,38 ± 0,08
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,50
Vazão da solução de sulfato (L/h)	13,7
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	9
Concentração da solução de barrilha (%)	0,24
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	6,1
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,84 ± 0,06

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio L3
Nº de câmaras de floc.	1
Tempo teórico de floc.(min)	4
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-
Vazão afl. água estudo (L/h)	1700
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	425
Vplacas (cm/min)	37
Reynolds entre as placas	435

## Características gerais da carreira de operação 17: ensaios F1 e F2

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,56	6,97	-
Temperatura (°C)	26,8	27,0	-
Cor aparente (uC)	4	102	-
Cor verdadeira (uC)	-	64	-
Turbidez (uT)	0,21	5,39	10,3
Condutividade (µmho/cm)	50,3	49,7	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	25	26	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	16	18	-
SST (mg/L)	-	2,9	28,4
SSF (mg/L)	-	2,3	23,9
SSV (mg/L)	-	0,6	4,5

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3
Dos. barrilha (mg/L)	10	7,5	8,75
pH de coagulação	6,36	6,25	6,28
Temperatura (°C)	26,4	26,2	26,8
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	15	9
	Vf=10,4 cm/min	6	6
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	0,76	0,51
	Vf=10,4 cm/min	0,32	0,30

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,39 ± 0,12
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,50
Vazão da solução de sulfato (L/h)	13,7
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	9
Concentração da solução de barrilha (%)	0,24
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	6,5
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,85 ± 0,06

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio F1	Ensaio F2
Nº de câmaras de floc.	3	3
Tempo teórico de floc.(min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	120
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	40	100
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	40	80
Vazão afl. água estudo (L/h)	1700	1700
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	708	708
Vplacas (cm/min)	62	62
Reynolds entre as placas	726	726

Características gerais da carreira de operação 18: ensaios F1 e F2

a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,08	6,72	-
Temperatura (°C)	26,0	26,1	-
Cor aparente (uC)	3	101	-
Cor verdadeira (uC)	-	65	-
Turbidez (uT)	0,18	5,43	9,5 ± 0,56
Condutividade (µmho/cm)	46,5	51,4	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	24	25	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	16	16	-
SST (mg/L)	-	4,8	28,5
SSF (mg/L)	-	3,3	22,5
SSV (mg/L)	-	1,5	6,0

b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatestes. DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente); Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P<sub>z</sub> ≈ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3
Dos. barrilha (mg/L)	10	7,5	5
pH de coagulação	6,44	6,36	6,28
Temperatura (°C)	27,3	26,5	26,3
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	25	12
	Vf=10,4 cm/min	8	7
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	1,36	0,70
	Vf=10,4 cm/min	0,32	0,28

c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,32 ± 0,04
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,25
Vazão da solução de sulfato (L/h)	27,4
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	20
Concentração da solução de barrilha (%)	0,24
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	14,0
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,85 ± 0,05

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio F1	Ensaio F2
Nº de câmaras de floc.	3	3
Tempo teórico de floc.(min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	120
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	40	100
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	40	80
Vazão afl. água estudo (L/h)	1700	1700
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	716	716
Vplacas (cm/min)	62	62
Reynolds entre as placas	734	734

Características gerais da carreira de operação 19: ensaios G3, G4 e G5

a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,06	6,89	-
Temperatura (°C)	26,0	26,1	-
Cor aparente (uC)	4	108	-
Cor verdadeira (uC)	-	65	-
Turbidez (uT)	0,16	6,14	8,74 ± 0,26
Condutividade (µmho/cm)	49,3	47,1	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	24	26	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	18	16	-
SST (mg/L)	-	2,8	26,7
SSF (mg/L)	-	2,3	19,7
SSV (mg/L)	-	0,5	7,0

b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete. DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente); Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3
Dos. barrilha (mg/L)	10	7,5	8,75
pH de coagulação	6,4	6,27	6,31
Temperatura (°C)	25,5	26,1	26,2
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	24	11
	Vf=10,4 cm/min	8	7
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	1,41	0,80
	Vf=10,4 cm/min	0,36	0,40

c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,31 ± 0,07
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,25
Vazão da solução de sulfato (L/h)	17,8
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	12
Concentração da solução de barrilha (%)	0,12
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	11,7
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,83 ± 0,06

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio G3	Ensaio G4	Ensaio G5
Nº de câmaras de floc.	2	2	2
Tempo teórico de floc.(min)	12	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	100	60	120
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	40	100
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-	-
Vazão afl. água estudo (L/h)	1130	1130	1130
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	717	717	717
Vplacas (cm/min)	63	63	63
Reynolds entre as placas	735	735	735

## Características gerais da carreira de operação 20: ensaio II

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,09	6,90	-
Temperatura (°C)	26,0	26,1	-
Cor aparente (uC)	4	101	-
Cor verdadeira (uC)	-	62	-
Turbidez (uT)	0,25	5,33	7,70
Condutividade (µmho/cm)	47,4	47,7	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	24	24	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	16	-	-
SST (mg/L)	-	4,8	24,7
SSF (mg/L)	-	2,8	18,0
SSV (mg/L)	-	2,0	6,7

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3	jarro 4
Dos. barrilha (mg/L)	10	8,75	7,5	11,25
pH de coagulação	6,42	6,31	6,23	6,43
Temperatura (°C)	26,6	25,7	26,1	25,3
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	13	10	12
	Vf=10,4 cm/min	7	6	7
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	0,65	0,42	0,55
	Vf=10,4 cm/min	0,26	0,19	0,25

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,28 ± 0,04
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,25
Vazão da solução de sulfato (L/h)	27,4
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	14
Concentração da solução de barrilha (%)	0,24
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	9,7
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,85 ± 0,01

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio II
Nº de câmaras de floc.	2
Tempo teórico de floc.(min)	8
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-
Vazão afl. água estudo (L/h)	1700
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	536
Vplacas (cm/min)	47
Reynolds entre as placas	549

## Características gerais da carreira de operação 21: ensaios D5, D1 e D6

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,20	6,78	-
Temperatura (°C)	26,8	27,5	-
Cor aparente (uC)	4	105	-
Cor verdadeira (uC)	-	61	-
Turbidez (uT)	0,32	5,95	8,67 ± 0,77
Condutividade (µmho/cm)	46,8	52,1	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	24	24	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	16	18	-
SST (mg/L)	-	7,2	24,7
SSF (mg/L)	-	3,8	17,8
SSV (mg/L)	-	3,4	6,9

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3
Dos. barrilha (mg/L)	11,25	12,5	10
pH de coagulação	6,35	6,4	6,34
Temperatura (°C)	27,1	26,1	25,8
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	13	22
	Vf=10,4 cm/min	1	7
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	0,62	1,02
	Vf=10,4 cm/min	0,33	0,31

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,34 ± 0,07
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,25
Vazão da solução de sulfato (L/h)	18,0
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	20
Concentração da solução de barrilha (%)	0,12
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	19,1
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,79 ± 0,09

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio D5	Ensaio D1	Ensaio D6
Nº de câmaras de floc.	2	2	2
Tempo teórico de floc.(min)	12	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	120	100	140
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	100	80	120
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-	-
Vazão afl. água estudo (L/h)	1130	1130	1130
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	361	361	361
Vplacas (cm/min)	31	31	31
Reynolds entre as placas	370	370	370

## Características gerais da carreira de operação 22: ensaios D1 e D5

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,29	6,95	-
Temperatura (°C)	27,2	26,1	-
Cor aparente (uC)	2	96	-
Cor verdadeira (uC)	-	58	-
Turbidez (uT)	0,24	5,17	9,73 ± 0,77
Condutividade (µmho/cm)	48,3	46,5	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	25	25	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	17	-	-
SST (mg/L)	-	3,0	27,3
SSF (mg/L)	-	1,8	21,9
SSV (mg/L)	-	1,3	5,4

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

DSA: 40 mg/L; Tmr: 10 seg; Gmr: 1000 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (12 min em cada gradiente);

Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3
Dos. barrilha (mg/L)	12,5	11,25	10
pH de coagulação	6,4	6,34	6,32
Temperatura (°C)	25	25	25
Cor apar. (uC)	Vf=21,0 cm/min	0	11
	Vf=10,4 cm/min	0	5
Turbidez (uT)	Vf=21,0 cm/min	1,04	0,62
	Vf=10,4 cm/min	0,00	0,29

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,36 ± 0,07
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	40
Concentração da solução de sulfato (%)	0,25
Vazão da solução de sulfato (L/h)	18,0
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	10
Concentração da solução de barrilha (%)	0,12
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	9,0
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	3,8 ± 0,07

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreu pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio D1	Ensaio D5
Nº de câmaras de floc.	2	2
Tempo teórico de floc.(min)	12	12
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	100	120
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	100
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	-	-
Vazão afl. água estudo (L/h)	1130	1130
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	358	358
Vplacas (cm/min)	31	31
Reynolds entre as placas	367	367

## **Apêndice 2b**

Tabelas referentes aos resultados das carreiras de operação realizadas na instalação  
com escoamento contínuo para a água tipo I

TABELA 7 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 1 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 85).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m³ água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot.(m³/m²d)	Vplacas (cm/min)	N° de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
B1	45	446	0,463	3,75	6,35	27,2	358	31	367	53	46,5	-	-	3,11	45,4	8,1	73,1	-	-	-	-
B1	60	441	0,484	3,88	6,36	27,2	359	31	368	29	70,6	-	-	1,99	65,1	3,3	88,9	-	-	-	-
B1	75	441	0,456	3,64	6,40	27,4	358	31	367	19	81,0	-	-	1,15	79,8	3,0	90,0	-	-	-	-
B1	90	441	0,475	3,79	6,34	27,4	359	31	368	14	86,4	-	-	0,85	85,1	2,0	93,3	-	-	-	-
B1	105	441	0,470	3,75	6,39	27,4	359	31	368	11	89,1	-	-	0,70	87,7	1,3	95,8	-	-	-	-
B1	120	441	0,470	3,75	6,39	27,4	359	31	368	10	90,2	-	-	0,69	87,9	1,3	95,8	-	-	-	-
B1	135	441	0,465	3,71	6,40	27,4	358	31	368	11	88,6	4	93,1	0,70	87,7	1,6	94,6	1,1	95,0	0,5	93,2
B2	150	441	0,475	3,78	6,39	27,5	359	31	368	10	90,4	-	-	0,60	89,5	2,6	91,4	-	-	-	-
B2	165	441	0,464	3,69	6,39	27,5	358	31	368	10	90,4	-	-	0,58	89,8	0,8	97,4	-	-	-	-
B2	180	441	0,453	3,60	6,45	27,6	358	31	367	9	91,1	-	-	0,59	89,6	1,1	96,3	-	-	-	-
B2	195	441	0,480	3,83	6,42	27,4	359	31	368	9	91,1	-	-	0,57	90,0	1,1	96,2	-	-	-	-
B2	210	441	0,481	3,83	6,39	27,5	359	31	368	9	91,1	-	-	0,55	90,4	1,8	94,2	-	-	-	-
B2	225	436	0,472	3,72	6,42	27,4	359	31	368	8	92,0	5	91,9	0,58	89,8	1,6	94,5	1,0	95,5	0,6	91,4
B3	240	441	0,471	3,75	6,45	27,5	359	31	368	9	90,9	-	-	0,68	88,1	1,0	96,7	-	-	-	-
B3	255	441	0,470	3,79	6,43	26,9	359	31	368	10	90,4	-	-	0,62	89,1	1,5	95,0	-	-	-	-
B3	270	441	0,475	3,87	6,44	26,5	359	31	368	9	90,6	-	-	0,67	88,2	1,6	94,5	-	-	-	-
B3	285	441	0,471	3,75	6,40	27,5	359	31	368	8	92,0	-	-	0,57	90,0	1,3	95,8	-	-	-	-
B3	300	441	0,479	3,81	6,32	27,5	359	31	368	9	91,1	-	-	0,76	86,7	1,0	96,6	-	-	-	-
B3	315	441	0,478	3,81	6,29	27,5	359	31	368	10	89,7	-	-	0,74	87,0	2,1	93,0	-	-	-	-
B3	330	441	0,482	3,81	6,42	27,8	359	31	368	11	89,3	-	-	0,72	87,4	2,6	91,4	-	-	-	-
B3	345	441	0,473	3,77	6,42	27,5	359	31	368	8	91,5	-	-	0,66	88,4	2,0	93,3	-	-	-	-
B3	360	441	0,483	3,85	6,47	27,4	359	31	368	10	89,7	4	93,1	0,64	88,8	1,6	94,6	1,0	95,6	0,6	91,48

TABELA 8 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 2 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 86).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m³ água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot. (m³/m²d)	Vplacas (cm/min)	Nº de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
G1	80	441	0,940	3,76	6,39	27,1	720	63	738	33	61,0	-	-	2,12	61,5	4,5	83,0	-	-	-	-
G1	95	441	0,940	3,76	6,36	27,1	720	63	738	23	73,6	-	-	1,43	74,0	5,0	81,1	-	-	-	-
G1	110	441	0,945	3,76	6,38	27,4	720	63	738	20	76,7	-	-	1,36	75,3	4,5	83,0	-	-	-	-
G1	125	441	0,941	3,77	6,34	27,0	720	63	738	22	74,4	-	-	1,48	73,1	5,5	79,2	-	-	-	-
G1	140	441	0,959	3,82	6,42	27,3	721	63	739	19	77,3	-	-	1,37	75,1	4,3	84,0	-	-	-	-
G1	155	441	0,939	3,74	6,41	27,3	720	63	738	22	74,4	-	-	1,44	73,9	5,0	81,1	-	-	-	-
G1	170	441	0,941	3,72	6,42	27,6	720	63	738	21	75,2	4	91,4	1,54	72,1	5,1	80,7	3,4	82,2	1,8	76,7
G2	185	441	0,937	3,73	6,41	27,3	720	63	738	23	73,1	-	-	1,52	72,4	6,0	77,4	-	-	-	-
G2	200	441	0,960	3,82	6,38	27,4	721	63	739	21	75,2	-	-	1,46	73,5	4,5	82,9	-	-	-	-
G2	215	441	0,944	3,75	6,36	27,4	720	63	738	19	77,5	-	-	1,40	74,6	4,9	81,4	-	-	-	-
G2	230	441	0,939	3,72	6,39	27,6	720	63	738	20	76,2	-	-	1,43	74,0	5,2	80,6	-	-	-	-
G2	245	441	0,944	3,74	6,36	27,6	720	63	738	24	72,3	-	-	1,59	71,1	5,2	80,2	-	-	-	-
G2	260	441	0,944	3,74	6,45	27,6	720	63	738	25	71,2	-	-	1,64	70,2	5,7	78,3	-	-	-	-
G2	275	441	0,948	3,73	6,38	27,8	720	63	738	21	75,2	-	-	1,42	74,2	4,7	82,3	-	-	-	-
G2	290	441	0,940	3,71	6,38	27,7	720	63	738	20	77,0	-	-	1,29	76,6	4,9	81,6	-	-	-	-
G2	305	441	0,943	3,72	6,50	27,7	720	63	738	16	80,9	3	92,0	1,17	78,8	3,9	85,4	2,0	89,5	1,9	75,0

TABELA 9 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 3 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 87).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m <sup>3</sup> água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot. (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	Vplacas (cm/min)	N° de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
B4	60	441	0,460	3,65	6,23	27,8	357	31	366	56	53,9	-	-	4,05	46,4	5,0	79,2	-	-	-	-
B4	75	441	0,479	3,83	6,29	27,5	357	31	366	33	73,2	-	-	2,18	71,2	3,7	84,4	-	-	-	-
B4	90	441	0,478	3,81	6,27	27,6	357	31	366	23	81,6	-	-	1,42	81,2	2,8	88,5	-	-	-	-
B4	105	441	0,480	3,83	6,23	27,6	357	31	366	18	85,1	-	-	1,12	85,2	1,5	93,8	-	-	-	-
B4	120	441	0,469	3,73	6,30	27,7	357	31	366	16	87,2	-	-	1,02	86,5	5,0	79,2	-	-	-	-
B4	135	441	0,473	3,77	6,26	27,7	357	31	366	14	88,7	-	-	0,90	88,1	2,6	89,3	-	-	-	-
B4	150	441	0,474	3,78	6,23	27,6	357	31	366	13	89,6	-	-	0,84	88,9	2,3	90,6	-	-	-	-
B4	165	441	0,475	3,78	6,24	27,7	357	31	366	13	89,2	4	92,6	0,85	88,8	2,4	90,1	1,4	92,8	1,0	80,0

TABELA 10 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 4 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 88).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m³ água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot.(m³/m³d)	Vplacas (cm/min)	N° de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
J2	30	441	0,721	3,86	6,34	26,8	543	47	557	49	55,5	-	-	2,92	55,8	6,7	69,3	-	-	-	-
J2	45	441	0,712	3,81	6,31	26,8	543	47	556	33	69,9	-	-	1,97	70,2	5,3	75,8	-	-	-	-
J2	60	441	0,714	3,83	6,24	26,7	543	47	556	45	59,5	-	-	2,63	60,2	8,0	63,6	-	-	-	-
J2	75	441	0,720	3,85	6,26	26,8	543	47	557	54	51,0	-	-	3,25	50,8	9,3	57,6	-	-	-	-
J2	90	441	0,711	3,79	6,26	26,9	543	47	556	56	49,2	-	-	3,41	48,3	10,3	53,0	-	-	-	-
J2	105	441	0,710	3,77	6,26	27,1	543	47	556	52	52,9	-	-	3,10	53,0	8,0	63,6	-	-	-	-
J2	120	441	0,705	3,74	6,30	27,1	542	47	556	37	66,7	-	-	2,10	68,2	5,3	75,8	-	-	-	-
J2	135	441	0,709	3,75	6,28	27,3	543	47	556	53	51,8	-	-	3,22	51,2	9,0	59,1	-	-	-	-
J2	150	441	0,710	3,74	6,28	27,4	543	47	556	33	70,1	8	86,0	1,96	70,3	5,5	75,0	4,3	73,4	1,3	79,2
E1	195	441	0,473	3,65	6,29	27,7	368	32	377	57	48,2	-	-	3,38	48,8	5,7	74,2	-	-	-	-
E1	210	441	0,466	3,60	6,25	27,7	368	32	377	41	62,7	-	-	2,39	63,8	3,0	86,4	-	-	-	-
E1	225	441	0,467	3,61	6,21	27,7	368	32	377	35	68,7	-	-	1,91	71,1	4,0	81,8	-	-	-	-
E1	240	441	0,475	3,67	6,29	27,7	368	32	377	34	69,3	-	-	1,89	71,4	5,4	75,3	-	-	-	-
E1	255	441	0,479	3,70	6,27	27,7	368	32	377	30	72,7	-	-	1,71	74,1	4,7	78,8	-	-	-	-
E1	270	441	0,467	3,60	6,25	27,8	368	32	377	31	72,3	-	-	1,73	73,8	4,3	80,5	-	-	-	-
E1	285	441	0,471	3,64	6,27	27,7	368	32	377	30	72,9	7	87,2	1,74	73,6	5,0	77,3	3,8	76,6	1,3	79,2

TABELA 11 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 5 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 89).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m <sup>3</sup> água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot.(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	Vplacas (cm/min)	N° de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
C1	45	441	0,227	3,63	6,20	27,6	356	31	365	33	67,9	-	-	1,92	67,8	3,2	86,5	-	-	-	-
C1	60	441	0,259	4,16	6,29	27,4	359	31	368	28	73,4	-	-	1,57	73,7	5,0	79,2	-	-	-	-
C1	75	441	0,232	3,72	6,26	27,4	357	31	366	25	76,4	-	-	1,40	76,5	3,7	84,4	-	-	-	-
C1	90	441	0,247	3,95	6,30	27,5	358	31	367	24	76,9	-	-	1,35	77,3	4,2	82,3	-	-	-	-
C1	105	441	0,240	3,82	6,30	27,7	357	31	366	23	78,2	-	-	1,26	78,9	4,3	82,3	-	-	-	-
C1	120	441	0,232	3,69	6,30	27,8	357	31	366	21	79,7	-	-	1,13	81,0	4,5	81,2	-	-	-	-
C1	135	441	0,240	3,80	6,31	28,0	357	31	366	21	79,9	-	-	1,12	81,2	3,6	85,0	-	-	-	-
C1	150	441	0,229	3,61	6,27	28,2	356	31	365	19	81,4	4	93,7	1,03	82,7	3,1	87,0	2,1	88,2	1,0	83,3
H1	195	441	0,480	3,84	6,29	27,9	708	62	726	45	56,5	-	-	2,59	56,5	5,9	75,4	-	-	-	-
H1	210	441	0,478	3,81	6,28	28,1	708	62	726	32	68,9	-	-	1,90	68,1	4,3	82,2	-	-	-	-
H1	225	441	0,478	3,81	6,28	28,1	708	62	726	26	74,7	-	-	1,49	75,0	4,4	81,7	-	-	-	-
H1	240	441	0,471	3,73	6,29	28,3	708	62	726	24	76,7	-	-	1,38	76,8	4,5	81,3	-	-	-	-
H1	255	441	0,476	3,76	6,38	28,5	708	62	726	24	77,3	-	-	1,33	77,7	4,2	82,5	-	-	-	-
H1	270	441	0,470	3,71	6,32	28,5	708	62	725	23	77,5	-	-	1,29	78,4	3,6	85,1	-	-	-	-
H1	285	441	0,475	3,77	6,29	28,3	708	62	726	23	77,7	-	-	1,22	79,5	4,0	83,3	-	-	-	-
H1	300	441	0,473	3,73	6,29	28,5	708	62	726	22	78,8	-	-	1,26	78,9	3,5	85,4	-	-	-	-
H1	315	441	0,466	3,69	6,30	28,4	707	62	725	23	78,4	5	90,9	1,27	78,7	4,1	82,8	2,9	84,0	1,3	79,2

TABELA 12 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 6 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 90).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m <sup>3</sup> água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot. (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)	Vplacas (cm/min)	N° de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
L1	45	441	1,401	3,76	6,41	26,8	720	63	738	73	21,4	-	-	5,15	8,7	20,5	39,7	-	-	-	-
L1	60	441	1,402	3,75	6,41	27,0	720	63	738	63	31,8	-	-	4,22	25,2	15,5	54,4	-	-	-	-
L1	75	441	1,396	3,72	6,38	27,1	720	63	738	69	25,8	-	-	4,43	21,5	17,0	50,0	-	-	-	-
L1	90	441	1,409	3,74	6,46	27,3	720	63	738	62	32,8	-	-	4,37	22,5	16,5	51,5	-	-	-	-
L1	105	441	1,407	3,73	6,33	27,4	720	63	738	61	34,2	-	-	4,35	22,9	16,5	51,5	-	-	-	-
L1	120	441	1,408	3,72	6,38	27,5	720	63	738	62	32,5	-	-	4,47	20,7	19,0	44,1	-	-	-	-
L1	135	441	1,403	3,69	6,44	27,7	720	63	738	63	32,0	12	75,0	4,36	22,7	16,7	51,0	11,9	50,3	4,7	52,5

TABELA 13 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 7 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 91).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m³ água)	pH após mistura rap.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot. (m³/m².d)	Vplacas (cm/min)	Nº de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
J1	25	441	0,700	3,82	6,30	26,4	358	31	367	65	38,4	-	-	4,11	34,8	10,0	68,8	-	-	-	-
J1	40	441	0,709	3,88	6,26	26,3	358	31	367	49	54,0	-	-	2,84	54,9	8,3	74,0	-	-	-	-
J1	55	441	0,707	3,86	6,27	26,3	358	31	367	46	56,3	-	-	2,75	56,3	9,3	71,1	-	-	-	-
J1	70	441	0,708	3,86	6,28	26,4	358	31	367	44	58,2	-	-	2,69	57,3	8,3	74,0	-	-	-	-
J1	85	441	0,710	3,85	6,28	26,6	358	31	367	39	63,5	-	-	2,46	61,0	7,3	77,1	-	-	-	-
J1	100	441	0,707	3,83	6,30	26,7	358	31	367	43	59,7	-	-	2,63	58,3	9,3	70,8	-	-	-	-
J1	115	441	0,711	3,85	6,30	26,7	358	31	367	40	62,0	6	88,8	2,45	61,1	8,0	75,0	6,0	75,3	2,0	73,9
A2	180	441	0,715	3,82	6,29	27,3	358	31	367	55	48,3	-	-	3,69	41,4	10,7	66,7	-	-	-	-
A2	195	441	0,710	3,79	6,28	27,3	358	31	367	24	77,2	-	-	1,58	74,9	3,7	88,4	-	-	-	-
A2	210	441	0,705	3,76	6,28	27,4	358	31	367	19	81,9	-	-	1,23	80,5	4,0	87,5	-	-	-	-
A2	225	441	0,707	3,76	6,28	27,5	358	31	367	18	82,5	-	-	1,22	80,6	3,7	88,4	-	-	-	-
A2	240	441	0,715	3,79	6,30	27,6	358	31	367	20	81,2	-	-	1,23	80,5	3,5	89,1	-	-	-	-
A2	255	441	0,709	3,75	6,31	27,7	358	31	367	13	87,3	4	92,4	0,91	85,6	2,6	91,8	1,6	93,3	1,0	87,0
A1	270	441	0,709	3,75	6,29	27,7	358	31	367	20	80,8	-	-	1,25	80,2	4,0	87,5	-	-	-	-
A1	285	441	0,707	3,73	6,29	27,8	358	31	367	16	84,8	-	-	1,04	83,5	3,3	89,6	-	-	-	-
A1	300	441	0,702	3,70	6,27	27,9	358	31	367	15	85,9	-	-	0,96	84,8	3,1	90,2	-	-	-	-
A1	315	441	0,702	3,71	6,27	27,8	358	31	367	13	87,3	-	-	0,86	86,3	3,0	90,6	-	-	-	-
A1	330	441	0,707	3,73	6,27	27,8	358	31	367	12	88,6	-	-	0,78	87,6	3,0	90,6	-	-	-	-
A1	345	441	0,712	3,76	6,28	27,8	358	31	367	12	88,8	-	-	0,76	87,9	2,3	92,9	-	-	-	-
A1	360	441	0,711	3,76	6,29	27,7	358	31	367	10	90,1	-	-	0,72	88,6	2,1	93,4	-	-	-	-
A1	375	441	0,710	3,77	6,29	27,6	358	31	367	10	90,5	-	-	0,60	90,5	1,5	95,3	-	-	-	-
A1	390	441	0,704	3,74	6,34	27,6	358	31	367	10	90,5	4	93,6	0,64	89,8	1,8	94,5	1,2	94,9	0,5	93,5

TABELA 14 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 8 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 92).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m³ água)	pH após mistura rap.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot. (m³/m²d)	Vplacas (cm/min)	Nº de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
F1	20	441	1,412	3,85	6,27	26,7	711	62	729	65	35,8	-	-	4,22	29,7	7,2	70,0	-	-	-	-
F1	35	441	1,425	3,89	6,26	26,7	711	62	729	57	44,1	-	-	3,66	39,0	9,2	61,7	-	-	-	-
F1	50	441	1,417	3,88	6,28	26,5	711	62	729	54	47,0	-	-	3,66	39,0	9,6	60,0	-	-	-	-
F1	65	441	1,408	3,82	6,27	26,9	711	62	729	55	46,1	-	-	3,58	40,3	10,8	55,0	-	-	-	-
F1	80	441	1,410	3,83	6,29	26,9	711	62	729	55	46,3	-	-	3,60	40,0	10,0	58,3	-	-	-	-
F1	95	441	1,411	3,85	6,28	26,7	711	62	729	57	44,3	11	80,7	3,59	40,2	10,6	55,8	8,6	57,0	2,0	50,0
F2	110	441	1,412	3,81	6,27	27,2	711	62	729	63	38,4	-	-	4,22	29,7	10,8	55,0	-	-	-	-
F2	125	441	1,406	3,78	6,31	27,3	711	62	729	62	39,1	-	-	4,17	30,5	11,6	51,7	-	-	-	-
F2	140	441	1,407	3,77	6,27	27,5	711	62	729	64	37,1	-	-	4,27	28,8	11,2	53,3	-	-	-	-
F2	155	441	1,419	3,79	6,28	27,6	711	62	729	61	40,0	-	-	4,08	32,0	11,6	51,7	-	-	-	-
F2	170	441	1,411	3,75	6,28	27,8	711	62	729	65	36,5	-	-	4,15	30,8	11,2	53,3	-	-	-	-
F2	175	441	1,409	3,75	6,29	27,8	711	62	729	62	39,1	14	76,5	3,99	33,5	11,0	54,2	8,8	56,0	2,2	45,0

TABELA 15 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 9 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 93).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m³ água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot.(m³/m²d)	Vplacas (cm/min)	N° de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
F3	20	441	1,418	3,91	6,24	26,3	710	62	728	54	49,9	-	-	3,62	35,4	11,6	43,4	-	-	-	-
F3	35	441	1,421	3,90	6,24	26,5	710	62	728	53	50,5	-	-	3,30	41,1	8,8	57,1	-	-	-	-
F3	50	441	1,400	3,84	6,26	26,5	710	62	728	51	53,0	-	-	3,13	44,1	9,6	53,2	-	-	-	-
F3	65	441	1,416	3,89	6,26	26,5	710	62	728	49	54,8	-	-	3,22	42,5	8,0	61,0	-	-	-	-
F3	80	441	1,420	3,87	6,26	26,8	710	62	728	51	53,0	-	-	3,26	41,8	9,2	55,1	-	-	-	-
F3	95	441	1,414	3,82	6,29	27,2	710	62	728	56	48,2	-	-	3,45	38,4	12,4	39,5	-	-	-	-
F3	110	441	1,410	3,82	6,28	27,1	710	62	728	51	53,0	10	83,2	3,40	39,3	9,6	53,2	7,4	56,5	2,2	37,1
F4	125	441	1,417	3,85	6,28	27,0	710	62	728	59	44,9	-	-	3,61	35,5	10,4	49,3	-	-	-	-
F4	140	441	1,413	3,82	6,27	27,2	710	62	728	60	43,9	-	-	3,87	30,9	10,0	51,2	-	-	-	-
F4	155	441	1,408	3,80	6,28	27,2	710	62	728	62	42,0	-	-	3,96	29,3	11,2	45,4	-	-	-	-
F4	170	441	1,410	3,76	6,28	27,8	710	62	728	63	41,8	-	-	3,97	29,1	10,8	47,3	-	-	-	-
F4	185	441	1,414	3,77	6,29	27,8	710	62	728	64	40,5	-	-	4,09	27,0	11,2	45,4	-	-	-	-
F4	193	441	1,401	3,72	6,31	28,0	710	62	728	60	43,9	10	83,2	4,18	25,4	11,2	45,4	9,4	44,7	1,8	48,6

TABELA 16 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 10 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 94).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m³ água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot. (m³/m³d)	Vplacas (cm/min)	Nº de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
A3	25	441	0,703	3,84	6,27	26,4	357	31	366	43	59,4	-	-	2,86	53,0	3,3	87,8	-	-	-	-
A3	40	441	0,709	3,88	6,25	26,4	357	31	366	24	77,1	-	-	1,57	74,2	2,7	90,2	-	-	-	-
A3	55	441	0,707	3,85	6,33	26,6	357	31	366	20	81,1	-	-	1,37	77,5	3,3	87,9	-	-	-	-
A3	70	441	0,700	3,79	6,23	26,8	357	31	366	16	84,9	-	-	1,01	83,4	2,8	89,6	-	-	-	-
A3	85	441	0,708	3,85	6,31	26,6	357	31	366	14	87,0	-	-	0,86	85,9	2,6	90,5	-	-	-	-
A3	100	441	0,702	3,77	6,29	27,2	357	31	366	13	87,5	-	-	0,81	86,7	2,7	90,2	-	-	-	-
A3	115	441	0,707	3,80	6,29	27,2	357	31	366	12	88,1	-	-	0,79	87,0	2,3	91,4	-	-	-	-
A3	130	441	0,715	3,83	6,28	27,3	357	31	366	13	87,5	3	94,8	0,80	86,8	2,9	89,3	1,6	92,2	1,3	81,0
A4	145	441	0,714	3,81	6,30	27,5	357	31	366	12	88,7	-	-	0,69	88,7	2,1	92,2	-	-	-	-
A4	160	441	0,713	3,79	6,29	27,6	357	31	366	13	87,7	-	-	0,74	87,8	3,1	88,6	-	-	-	-
A4	175	441	0,711	3,77	6,30	27,8	357	31	366	12	88,1	-	-	0,75	87,7	3,1	88,7	-	-	-	-
A4	190	441	0,703	3,71	6,29	27,9	357	31	366	14	86,8	-	-	0,80	86,8	3,7	86,4	-	-	-	-
A4	205	441	0,705	3,73	6,28	27,9	357	31	366	14	86,6	-	-	0,80	86,8	2,6	90,6	-	-	-	-
A4	220	441	0,710	3,75	6,28	27,9	357	31	366	13	87,7	3	94,8	0,76	87,5	2,2	91,8	1,3	93,4	0,9	87,5
A2	235	441	0,708	3,74	6,28	27,9	357	31	366	14	86,2	-	-	0,84	86,2	3,3	87,8	-	-	-	-
A2	250	441	0,715	3,78	6,30	27,9	357	31	366	11	89,2	-	-	0,70	88,5	2,5	91,0	-	-	-	-
A2	265	441	0,712	3,76	6,34	27,9	357	31	366	12	88,3	-	-	0,73	88,0	2,7	90,2	-	-	-	-
A2	280	441	0,711	3,77	6,39	27,7	357	31	366	9	91,1	-	-	0,61	90,0	2,5	91,0	-	-	-	-
A2	289	441	0,713	3,80	6,30	27,5	357	31	366	10	90,0	3	94,8	0,71	88,3	2,0	92,7	0,9	95,6	1,1	84,4

TABELA 17 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 11 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 95).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m³ água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot. (m³/m²d)	Vplacas (cm/min)	Nº de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
D1	20	441	0,942	3,78	6,40	27,0	360	31	369	22	79,1	-	-	1,27	78,9	4,3	86,9	-	-	-	-
D1	35	441	0,945	3,78	6,36	27,2	360	31	369	16	84,6	-	-	0,85	85,9	4,0	87,9	-	-	-	-
D1	50	441	0,944	3,77	6,33	27,2	360	31	369	16	84,6	-	-	0,85	85,9	3,7	88,6	-	-	-	-
D1	65	441	0,941	3,76	6,36	27,2	360	31	369	16	84,6	-	-	0,88	85,4	4,0	87,9	-	-	-	-
D1	80	441	0,945	3,78	6,35	27,2	360	31	369	16	85,2	-	-	0,82	86,4	3,8	88,6	-	-	-	-
D1	95	441	0,943	3,77	6,34	27,2	360	31	369	16	85,0	-	-	0,86	85,7	3,0	90,9	-	-	-	-
D1	110	441	0,944	3,77	6,37	27,2	360	31	369	15	86,0	7	89,5	0,80	86,7	4,6	86,0	3,4	87,0	1,3	82,1
D2	130	441	0,946	3,77	6,39	27,3	360	31	369	23	78,4	-	-	1,23	79,6	4,6	86,1	-	-	-	-
D2	145	441	0,937	3,74	6,32	27,3	360	31	369	20	81,4	-	-	1,06	82,4	3,4	89,6	-	-	-	-
D2	160	441	0,939	3,74	6,31	27,3	360	31	369	19	81,8	-	-	1,01	83,3	4,9	85,3	-	-	-	-
D2	175	441	0,943	3,75	6,34	27,4	360	31	369	29	72,7	-	-	1,64	72,8	6,6	80,1	-	-	-	-
D2	190	441	0,940	3,72	6,32	27,6	360	31	369	31	70,8	-	-	1,74	71,1	6,9	79,2	-	-	-	-
D2	205	441	0,938	3,70	6,37	27,8	360	31	369	28	73,4	-	-	1,62	73,1	5,4	83,5	-	-	-	-
D2	220	441	0,940	3,69	6,25	28,0	360	31	369	21	80,3	8	86,7	1,14	81,1	5,9	82,1	3,9	85,1	2,0	70,8

TABELA 18 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 12 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 96).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m <sup>3</sup> água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot. (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	Vplacas (cm/min)	N° de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
D3	35	441	0,938	3,81	6,34	26,7	358	31	367	27	75,5	-	-	1,40	78,2	6,6	79,5	-	-	-	-
D3	50	441	0,943	3,83	6,36	26,7	358	31	367	29	74,1	-	-	1,56	75,7	5,4	83,0	-	-	-	-
D3	65	441	0,945	3,83	6,34	26,8	358	31	367	39	64,8	-	-	2,36	63,3	7,7	75,9	-	-	-	-
D3	80	441	0,958	3,87	6,37	26,9	358	31	367	31	72,3	-	-	1,83	71,5	6,3	80,4	-	-	-	-
D3	95	441	0,946	3,82	6,34	26,9	358	31	367	26	76,5	-	-	1,41	78,1	4,9	84,8	-	-	-	-
D3	110	441	0,940	3,79	6,33	27,0	358	31	367	27	75,9	-	-	1,39	78,4	4,9	84,8	-	-	-	-
D3	125	441	0,939	3,80	6,34	26,9	358	31	367	24	78,7	7	89,9	1,24	80,7	4,7	85,3	3,4	86,8	1,3	78,6
D4	155	441	0,945	3,81	6,34	27,0	358	31	367	34	69,6	-	-	1,94	69,8	6,3	80,4	-	-	-	-
D4	170	441	0,949	3,83	6,35	27,0	358	31	367	34	69,4	-	-	1,94	69,8	6,6	79,5	-	-	-	-
D4	185	441	0,939	3,80	6,33	26,9	358	31	367	33	69,8	-	-	1,91	70,3	6,3	80,4	-	-	-	-
D4	200	441	0,941	3,81	6,35	26,8	358	31	367	33	70,7	-	-	1,83	71,5	6,0	81,3	-	-	-	-
D4	215	441	0,945	3,82	6,34	26,9	358	31	367	34	69,4	-	-	1,95	69,6	6,9	78,6	-	-	-	-
D4	230	441	0,948	3,84	6,34	26,8	358	31	367	27	75,5	-	-	1,53	76,2	4,9	84,8	-	-	-	-
D4	245	441	0,950	3,85	6,39	26,8	358	31	367	29	73,7	8	88,6	1,63	74,6	5,9	81,7	4,1	84,1	1,7	71,4

TABELA 19 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 13 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 97).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m <sup>3</sup> água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot. (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	Vplacas (cm/min)	N° de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
11	40	441	1,407	3,80	6,35	27,3	531	46	544	52	50,7	-	-	3,41	45,0	10,4	63,7	-	-	-	-
11	55	441	1,410	3,81	6,24	27,3	531	46	545	53	49,2	-	-	3,65	41,1	11,2	60,9	-	-	-	-
11	70	441	1,423	3,85	6,31	27,3	531	46	545	51	51,2	-	-	3,25	47,6	10,0	65,1	-	-	-	-
11	85	441	1,422	3,83	6,29	27,4	531	46	545	52	50,3	-	-	3,41	45,0	10,4	63,7	-	-	-	-
11	100	441	1,416	3,83	6,30	27,3	531	46	545	54	48,8	-	-	3,45	44,4	10,8	62,3	-	-	-	-
11	115	441	1,420	3,83	6,30	27,4	531	46	545	57	45,8	-	-	3,69	40,5	10,8	62,3	-	-	-	-
11	130	441	1,421	3,82	6,31	27,5	531	46	545	56	46,9	-	-	3,63	41,5	11,2	60,9	-	-	-	-
11	145	441	1,419	3,81	6,33	27,6	531	46	545	55	47,5	-	-	3,69	40,5	12,0	58,1	-	-	-	-
11	160	441	1,413	3,79	6,42	27,6	531	46	545	56	46,7	8	86,4	3,64	41,3	11,4	60,2	7,6	65,5	3,8	43,0

TABELA 20 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 14 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 98).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m³ água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot.(m³/m².d)	Vplacas (cm/min)	Nº de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
D2	45	441	0,949	3,81	6,34	27,2	358	31	367	33	67,6	-	-	2,01	65,6	6,4	78,9	-	-	-	-
D2	60	441	0,954	3,82	6,38	27,4	358	31	367	33	67,4	-	-	2,10	64,0	7,3	75,8	-	-	-	-
D2	75	441	0,947	3,79	6,38	27,4	358	31	367	39	62,2	-	-	2,35	59,7	7,3	75,8	-	-	-	-
D2	90	441	0,949	3,81	6,35	27,3	358	31	367	34	66,8	-	-	2,16	63,0	7,7	74,7	-	-	-	-
D2	105	441	0,943	3,77	6,36	27,4	358	31	367	39	61,9	-	-	2,43	58,4	7,7	74,7	-	-	-	-
D2	120	441	0,944	3,78	6,33	27,4	358	31	367	38	63,0	-	-	2,42	58,5	7,7	74,7	-	-	-	-
D2	135	441	0,939	3,75	6,35	27,5	358	31	367	40	60,4	7	88,3	2,46	57,8	7,0	76,9	5,2	77,7	1,8	74,3
D3	150	441	0,943	3,76	6,34	27,5	358	31	367	36	64,8	-	-	2,22	62,0	8,0	73,6	-	-	-	-
D3	165	441	0,952	3,79	6,33	27,6	358	31	367	35	65,2	-	-	2,15	63,2	6,7	78,0	-	-	-	-
D3	180	441	0,940	3,74	6,36	27,6	358	31	367	37	64,1	-	-	2,27	61,1	7,3	75,8	-	-	-	-
D3	195	441	0,941	3,75	6,49	27,6	358	31	367	33	68,1	-	-	2,08	64,4	6,0	80,2	-	-	-	-
D3	210	441	0,943	3,76	6,30	27,6	358	31	367	36	64,6	7	88,0	2,17	62,8	6,4	78,9	5,0	78,6	1,4	80,0

TABELA 21 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 15 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 99).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m³ água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot.(m³/m²d)	Vplacas (cm/min)	N° de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
L2	40	441	1,416	3,87	6,46	26,8	531	46	545	85	19,6	-	-	5,57	8,6	13,6	51,4	-	-	-	-
L2	55	441	1,411	3,86	6,36	26,8	531	46	545	72	32,1	-	-	4,62	24,2	13,6	51,4	-	-	-	-
L2	70	441	1,410	3,84	6,37	26,9	531	46	545	70	33,4	-	-	4,58	24,9	11,6	58,6	-	-	-	-
L2	85	441	1,418	3,87	6,37	26,9	531	46	545	72	31,5	-	-	4,70	22,9	14,0	50,0	-	-	-	-
L2	100	441	1,420	3,86	6,43	27,0	532	46	545	68	35,1	-	-	4,51	26,0	12,8	54,3	-	-	-	-
L2	115	441	1,412	3,83	6,41	27,1	531	46	545	69	34,7	-	-	4,50	26,2	13,2	52,9	-	-	-	-
L2	130	441	1,412	3,84	6,40	27,0	531	46	545	73	31,1	-	-	4,72	22,6	13,2	52,9	-	-	-	-
L2	145	441	1,420	3,85	6,50	27,1	532	46	545	75	28,9	-	-	4,83	20,8	14,4	48,6	-	-	-	-
L2	160	441	1,424	3,86	6,47	27,1	532	46	545	74	30,2	-	-	4,78	21,6	14,0	50,0	-	-	-	-
L2	175	441	1,419	3,85	6,31	27,1	532	46	545	75	28,5	10	83,3	4,92	19,3	13,2	52,9	10,2	46,3	3,0	66,7

TABELA 22 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 16 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 100).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m³ água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot. (m³/m²d)	Vplacas (cm/min)	N° de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
L3	25	441	1,423	3,89	6,30	26,8	425	37	435	78	21,1	-	-	5,08	9,1	12,8	61,2	-	-	-	-
L3	40	441	1,417	3,86	6,36	27,0	425	37	435	77	22,7	-	-	5,11	8,6	13,6	58,8	-	-	-	-
L3	55	441	1,416	3,85	6,36	27,1	425	37	435	78	22,0	-	-	5,12	8,4	12,8	61,2	-	-	-	-
L3	70	441	1,418	3,84	6,37	27,2	425	37	435	77	22,3	-	-	5,01	10,4	14,0	57,6	-	-	-	-
L3	85	441	1,432	3,86	6,46	27,4	425	37	436	76	23,6	-	-	4,74	15,2	13,6	58,8	-	-	-	-
L3	100	441	1,420	3,83	6,43	27,4	425	37	435	77	22,7	-	-	4,81	14,0	12,8	61,2	-	-	-	-
L3	115	441	1,416	3,79	6,46	27,7	425	37	435	76	24,0	-	-	4,81	14,0	12,8	61,2	-	-	-	-
L3	130	441	1,410	3,78	6,46	27,7	425	37	435	73	26,7	12	80,6	4,62	17,4	13,4	59,4	9,2	63,2	4,2	47,5

TABELA 23 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 17 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 101).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m <sup>3</sup> água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot.(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	Vplacas (cm/min)	N° de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
F1	60	441	1,415	3,87	6,32	26,8	708	62	726	68	33,6	-	-	3,99	26,0	11,5	59,4	-	-	-	-
F1	75	441	1,415	3,88	6,32	26,7	708	62	726	70	32,0	-	-	4,15	23,1	11,4	59,7	-	-	-	-
F1	90	441	1,415	3,86	6,27	26,9	708	62	726	69	32,5	-	-	4,12	23,6	11,4	59,7	-	-	-	-
F1	105	441	1,433	3,90	6,28	27,0	708	62	726	68	33,3	16	75,7	4,03	25,3	11,2	60,4	8,6	64,2	2,7	40,4
F2	120	441	1,421	3,86	6,29	27,1	708	62	726	72	29,2	-	-	4,37	19,0	11,7	58,7	-	-	-	-
F2	135	441	1,424	3,87	6,37	27,1	708	62	726	72	30,1	-	-	4,25	21,2	12,6	55,7	-	-	-	-
F2	150	441	1,405	3,79	6,38	27,4	708	62	726	71	30,7	-	-	4,28	20,6	14,0	50,6	-	-	-	-
F2	165	441	1,425	3,83	6,50	27,6	708	62	726	70	31,4	16	74,3	4,30	20,3	11,2	60,6	8,6	63,8	2,5	43,4

TABELA 24 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 18 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 102).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m <sup>3</sup> água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot.(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	Vplacas . (cm/min)	N° de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
F1	80	441	1,426	3,84	6,29	27,0	716	62	735	83	18,3	-	-	5,03	7,4	15,0	47,4	-	-	-	-
F1	95	441	1,422	3,83	6,34	26,9	716	62	734	69	32,1	-	-	4,37	19,5	12,0	57,9	-	-	-	-
F1	110	441	1,406	3,80	6,36	26,8	716	62	734	69	31,7	-	-	4,33	20,3	12,7	55,6	-	-	-	-
F1	125	441	1,437	3,90	6,32	26,6	717	62	735	69	31,7	14	78,3	4,34	20,1	13,0	54,4	9,8	56,3	3,2	47,2
F2	140	441	1,420	3,84	6,29	26,8	716	62	734	74	26,8	-	-	4,72	13,1	15,7	45,0	-	-	-	-
F2	155	441	1,427	3,86	6,28	26,7	716	62	735	75	26,0	-	-	4,55	16,2	14,3	49,7	-	-	-	-
F2	170	441	1,410	3,82	6,28	26,7	716	62	734	67	34,1	14	78,6	3,96	27,1	12,5	56,1	9,3	58,5	3,2	47,2

TABELA 25 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 19 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 103).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m³ água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot.(m³/m²d)	Vplacas (cm/min)	N° de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
G3	45	441	0,950	3,89	6,30	26,3	717	63	735	40	62,9	-	-	2,19	64,3	7,0	73,8	-	-	-	-
G3	60	441	0,949	3,88	6,27	26,4	717	63	735	43	60,0	-	-	2,35	61,7	7,3	72,8	-	-	-	-
G3	75	441	0,946	3,85	6,27	26,5	717	63	735	51	53,0	-	-	2,73	55,5	8,3	68,9	-	-	-	-
G3	90	441	0,940	3,80	6,25	26,8	717	63	735	34	68,7	-	-	1,82	70,3	5,5	79,4	-	-	-	-
G3	105	441	0,946	3,84	6,30	26,7	717	63	735	35	67,3	-	-	1,84	70,0	6,3	76,6	-	-	-	-
G3	120	441	0,945	3,82	6,38	26,8	717	63	735	38	64,6	11	82,5	2,04	66,7	6,1	77,0	3,9	80,3	2,2	67,9
G4	135	441	0,936	3,78	6,24	26,9	717	63	735	42	60,8	-	-	2,22	63,8	7,0	73,8	-	-	-	-
G4	150	441	0,934	3,77	6,27	26,9	717	63	735	53	50,5	-	-	3,18	48,2	9,4	64,6	-	-	-	-
G4	165	441	0,948	3,83	6,28	26,9	717	63	735	53	50,5	-	-	3,24	47,2	8,9	66,8	-	-	-	-
G4	180	441	0,959	3,85	6,29	27,1	718	63	736	45	58,6	-	-	2,49	59,4	7,5	71,8	-	-	-	-
G4	195	441	0,947	3,81	6,28	27,1	717	63	735	53	50,3	-	-	3,05	50,3	9,6	64,0	-	-	-	-
G4	210	441	0,949	3,82	6,27	27,0	717	63	735	59	44,9	9	85,6	3,38	44,9	10,6	60,4	7,7	60,8	2,9	59,2
G5	225	441	0,947	3,81	6,29	27,1	717	63	735	39	64,0	-	-	2,08	66,1	6,3	76,6	-	-	-	-
G5	240	441	0,937	3,77	6,30	27,1	717	63	735	74	31,0	-	-	4,24	30,9	11,7	56,2	-	-	-	-
G5	255	441	0,953	3,84	6,27	27,0	717	63	736	65	39,9	-	-	3,73	39,2	13,8	48,4	-	-	-	-
G5	270	441	0,949	3,81	6,29	27,1	717	63	735	57	47,2	14	78,8	3,24	47,2	9,3	65,0	6,8	65,3	2,5	64,3

TABELA 26 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 20 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 104).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m <sup>3</sup> água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot. (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	Vplacas (cm/min)	N° de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
II	40	441	1,409	3,86	6,27	26,3	536	47	549	65	35,4	-	-	3,69	30,7	12,4	49,7	-	-	-	-
II	55	441	1,412	3,86	6,28	26,4	536	47	549	70	30,8	-	-	3,99	25,1	13,6	44,9	-	-	-	-
II	70	441	1,415	3,86	6,29	26,5	536	47	549	67	34,3	-	-	3,84	27,9	13,2	46,5	-	-	-	-
II	85	441	1,419	3,85	6,31	26,7	536	47	549	66	34,8	-	-	3,81	28,5	12,8	48,1	-	-	-	-
II	100	441	1,423	3,85	6,24	26,8	536	47	550	67	33,9	-	-	3,77	29,2	13,2	46,5	-	-	-	-
II	115	441	1,419	3,85	6,27	26,7	536	47	549	65	35,4	-	-	3,72	30,1	12,8	48,1	-	-	-	-
II	130	441	1,429	3,86	6,32	26,9	536	47	550	70	30,8	-	-	3,87	27,3	14,0	43,2	-	-	-	-
II	145	441	1,423	3,84	6,32	27,0	536	47	550	66	34,8	9	85,0	3,74	29,8	12,4	49,9	9,3	48,5	3,1	53,5

TABELA 27 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 21 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 105).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m³ água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot.(m³/m²d)	Vplacas (cm/min)	N° de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
D5	35	441	0,948	3,82	6,34	26,5	361	31	370	31	70,8	-	-	1,63	72,6	3,2	86,8	-	-	-	-
D5	50	436	0,958	3,81	6,28	26,5	361	31	370	39	63,0	-	-	2,18	63,4	6,3	74,7	-	-	-	-
D5	65	441	0,940	3,75	6,35	26,9	361	31	370	37	64,5	-	-	2,04	65,7	5,5	77,7	-	-	-	-
D5	80	441	0,970	3,88	6,33	26,8	361	32	370	36	66,0	-	-	2,02	66,1	6,0	75,7	-	-	-	-
D5	95	441	0,951	3,78	6,35	27,0	361	31	370	36	65,5	10	83,6	2,11	64,5	6,0	75,7	4,4	75,4	1,6	76,4
D1	110	441	0,940	3,75	6,34	26,9	361	31	370	42	60,0	-	-	2,45	58,8	6,7	72,6	-	-	-	-
D1	125	441	0,961	3,82	6,31	27,1	361	31	370	43	59,4	-	-	2,46	58,7	7,3	70,6	-	-	-	-
D1	140	441	0,944	3,76	6,35	27,0	361	31	370	37	64,2	-	-	2,15	63,9	6,7	73,0	-	-	-	-
D1	155	441	0,950	3,77	6,41	27,1	361	31	370	41	60,8	-	-	2,33	60,8	6,8	72,2	-	-	-	-
D1	170	441	0,939	3,73	6,41	27,1	361	31	370	41	61,3	13	79,2	2,32	61,0	7,4	70,1	5,3	70,5	2,1	69,2
D6	185	441	0,949	3,75	6,31	27,3	361	31	370	47	54,7	-	-	2,76	53,6	8,9	64,0	-	-	-	-
D6	200	441	0,949	3,76	6,27	27,2	361	31	370	38	63,8	-	-	2,23	62,5	6,7	73,0	-	-	-	-
D6	215	441	0,936	3,70	6,33	27,3	361	31	370	48	53,8	-	-	2,81	52,8	8,5	65,5	-	-	-	-
D6	230	441	0,949	3,75	6,30	27,3	361	31	370	45	56,8	-	-	2,62	56,0	8,2	66,6	-	-	-	-
D6	245	441	0,938	3,71	6,35	27,3	361	31	370	49	53,0	15	75,2	2,86	51,9	8,8	64,5	6,6	62,7	2,1	69,2

TABELA 28 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 22 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 106).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m³ água)	pH após mistura rap.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot. (m³/m³d)	Vplacas (cm/min)	Nº de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
D1	35	441	0,954	3,85	6,32	27,0	358	31	367	41	57,0	-	-	2,42	53,2	6,7	75,3	-	-	-	-
D1	50	441	0,947	3,85	6,31	26,7	358	31	367	35	63,9	-	-	2,01	61,1	6,0	78,0	-	-	-	-
D1	65	441	0,955	3,87	6,31	26,8	358	31	367	33	66,0	-	-	1,92	62,9	5,7	78,9	-	-	-	-
D1	80	441	0,940	3,85	6,32	26,4	358	31	367	29	69,9	-	-	1,78	65,6	4,8	82,6	-	-	-	-
D1	95	441	0,951	3,87	6,32	26,7	358	31	367	24	75,3	-	-	1,33	74,3	4,0	85,4	-	-	-	-
D1	110	441	0,939	3,82	6,29	26,7	358	31	367	33	65,6	7	88,5	1,87	63,8	6,1	77,5	5,0	77,2	1,1	78,9
D5	125	441	0,932	3,76	6,31	27,0	358	31	367	30	69,0	-	-	1,85	64,2	6,0	77,9	-	-	-	-
D5	140	441	0,944	3,83	6,40	26,8	358	31	367	35	63,5	-	-	2,08	59,8	5,9	78,5	-	-	-	-
D5	155	441	0,942	3,79	6,43	27,1	358	31	367	33	65,8	-	-	1,97	61,9	6,1	77,5	-	-	-	-
D5	170	441	0,925	3,73	6,32	27,1	358	31	367	31	67,4	-	-	1,92	62,9	4,8	82,2	-	-	-	-
D5	185	441	0,943	3,80	6,31	27,1	358	31	367	35	63,5	-	-	1,96	62,1	6,0	78,0	-	-	-	-
D5	200	441	0,940	3,77	6,30	27,3	358	31	367	37	61,2	6	88,9	2,13	58,8	6,5	76,2	4,9	77,8	1,6	69,8

### **Apêndice 3**

Tabelas referentes aos ensaios realizados com o equipamento de flotateste para a água  
tipo II

TABELA 29 - Resultados obtidos, em ensaios de coagulação-floculação-flotação e coagulação-floculação-sedimentação realizados no reator estático, em função da variação da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação. Dosagens de sulfato de alumínio - DSA- testadas: 20, 25, 30, 40, 50, 60 e 70 mg/L; pH de coagulação: entre 5,2 e 7,2. Ensaios de coagulação-floculação-flotação: velocidade de flotação:  $V_f = 16,25$  cm/min; pressão de saturação: 441 kPa; fração de recirculação: 8% (em volume). Ensaios de coagulação-floculação-sedimentação: velocidade de sedimentação:  $V_s = 1,5$  cm/min. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT, temperatura:  $21,7 \pm 1,5$  °C.

DSA (mg/L)	Flotação: velocidade de flotação= 16,25 cm/min								Sedimentação: velocidade de sedimentação= 1,5 cm/min							
	Dosagem de barrilha (mg/L)	Dosagem de ácido clorídrico (mL/L)*	pH após mistura rápida	Temperatura após mistura rápida (°C)	Remanescente		Remoção (%)		Dosagem de barrilha (mg/L)	Dosagem de ácido clorídrico (mL/L)*	pH após mistura rápida	Temperatura após mistura rápida (°C)	Remanescente		Remoção (%)	
					Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez					Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez
20	-	6,0	5,25	22,7	54	1,53	79,5	67,0	-	6,0	5,21	22,6	254	7,02	3,4	-51,0
20	-	6,0	5,33	22,8	39	1,09	85,1	76,5	-	4,5	5,74	21,9	227	6,91	13,5	-48,6
20	-	5,0	5,63	23,0	31	0,79	88,1	83,0	-	3,0	6,05	21,9	221	6,63	16,1	-42,6
20	-	3,0	6,06	22,1	29	0,92	89,0	80,3	-	1,5	6,40	22,4	221	6,06	15,9	-30,3
20	-	1,5	6,42	22,6	42	0,95	84,2	79,6	-	-	6,64	22,5	279	7,64	-6,3	-64,3
20	-	-	6,66	22,8	227	5,37	13,7	-15,4	-	-	-	-	-	-	-	-
25	-	6,0	5,24	22,4	276	8,33	-4,9	-79,1	-	6,0	5,25	22,3	290	10,60	-10,2	-128,0
25	-	4,5	5,89	22,5	44	1,22	83,2	73,8	-	4,5	5,78	22,4	277	9,89	-5,4	-112,7
25	-	3,0	6,16	22,1	24	0,73	91,0	84,2	-	3,0	6,14	22,0	150	4,54	43,0	2,4
25	-	2,0	6,38	22,0	30	0,75	88,7	84,0	-	2,0	6,37	22,0	127	3,94	51,7	15,3
25	-	1,0	6,65	22,2	29	0,89	88,8	81,0	-	1,0	6,73	22,4	165	5,00	37,1	-7,5
25	-	-	6,85	22,3	36	1,18	86,2	74,7	-	-	6,85	22,3	173	5,24	34,3	-12,7
30	-	4,0	5,54	22,5	269	7,96	-2,5	-71,2	-	4,0	5,53	22,7	284	7,46	-8,1	-60,4
30	-	2,5	5,82	22,6	51	1,25	80,7	73,1	-	1,5	6,02	21,3	194	5,65	26,2	-21,5
30	-	1,0	6,07	21,3	30	0,71	88,6	84,7	-	1,0	6,08	21,2	173	5,07	34,1	-9,0
30	2,5	-	6,31	21,1	24	0,68	90,8	85,4	5,0	-	6,31	21,1	135	3,92	48,7	15,7
30	12,5	-	6,45	22,6	43	0,86	83,8	81,4	12,5	-	6,53	22,5	179	5,13	31,9	-10,3
30	20,0	-	6,66	22,5	146	3,30	44,3	28,9	20,0	-	6,68	22,8	247	6,44	5,8	-38,5

\* Dosagem da solução de HCl preparada a 0,5%.

TABELA 29 - Resultados obtidos, em ensaios de coagulação-floculação-flotação e coagulação-floculação-sedimentação realizados no reator estático, em função da variação da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação. Dosagens de sulfato de alumínio - DSA- testadas: 20, 25, 30, 40, 50, 60 e 70 mg/L; pH de coagulação: entre 5,2 e 7,2. Ensaio de coagulação-floculação-flotação: velocidade de flotação: Vf= 16,25 cm/min; pressão de saturação: 441 kPa; fração de recirculação: 8% (em volume). Ensaio de coagulação-floculação-sedimentação: velocidade de sedimentação: Vs= 1,5 cm/min. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT, temperatura: 21,7 ± 1,5 °C.

DSA (mg/L)	Flotação: velocidade de flotação= 16,25 cm/min								Sedimentação: velocidade de sedimentação= 1,5 cm/min							
	Dosagem de barrilha (mg/L)	Dosagem de ácido clorídrico (mL/L)*	pH após mistura rápida	Temperatura após mistura rápida (°C)	Remanescente		Remoção (%)		Dosagem de barrilha (mg/L)	Dosagem de ácido clorídrico (mL/L)*	pH após mistura rápida	Temperatura após mistura rápida (°C)	Remanescente		Remoção (%)	
					Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez					Cor aparente	Turbidez		
40	-	1,0	5,90	22,4	245	6,71	6,7	-44,2	-	1,0	5,72	22,5	298	8,77	-13,2	-88,6
40	-	-	6,07	22,2	52	1,36	80,3	70,7	-	-	6,04	22,5	238	7,19	9,6	-54,6
40	5,0	-	6,17	23,0	28	0,67	89,2	85,6	5,0	-	6,22	23,1	156	4,24	40,8	8,8
40	10,0	-	6,39	22,8	23	0,62	91,3	86,8	15,0	-	6,54	22,7	130	3,59	50,4	22,8
40	20,0	-	6,63	22,8	33	0,86	87,5	81,4	20,0	-	6,64	22,8	124	3,54	52,8	23,9
40	25,0	-	6,75	20,3	57	1,38	78,4	70,3	25,0	-	6,87	20,3	150	3,78	43,1	18,7
40	30,0	-	6,97	20,3	207	4,72	21,3	-1,5	30,0	-	6,97	20,2	280	6,80	-6,5	-46,2
50	-	-	5,86	22,0	263	7,82	0,0	-68,2	-	-	5,86	21,7	292	8,50	-11,0	-82,8
50	5,0	-	6,11	21,9	37	1,03	85,9	77,9	10,0	-	6,26	21,6	148	4,25	43,8	8,6
50	15,0	-	6,45	21,3	23	0,53	91,3	88,6	15,0	-	6,43	21,2	105	2,79	60,0	40,0
50	20,0	-	6,56	21,7	31	0,64	88,1	86,3	20,0	-	6,63	21,5	130	3,61	50,5	22,4
50	27,5	-	6,76	21,6	55	1,18	79,1	74,7	27,5	-	6,71	21,5	137	3,52	48,0	24,3
50	40,0	-	7,01	21,5	270	7,10	-2,6	-52,6	32,5	-	6,88	21,5	154	4,11	41,5	11,6
60	5,0	-	5,88	22,0	283	13,2	-7,7	-183,4	5,0	-	5,85	22,0	278	9,87	-5,6	-112,3
60	17,5	-	6,22	22,4	32	1,24	87,7	73,3	17,5	-	6,20	22,1	230	7,62	12,4	-63,9
60	25,0	-	6,36	22,2	22	0,73	91,6	84,2	25,0	-	6,39	21,7	168	5,34	36,3	-14,8
60	37,5	-	6,59	22,6	18	0,60	93,2	87,0	37,5	-	6,66	22,0	178	5,81	32,3	-24,9
60	45,0	-	6,76	22,3	33	1,02	87,3	78,2	45,0	-	6,82	22,0	191	5,73	27,5	-23,2

\* Dosagem da solução de HCl preparada a 0,5%.

TABELA 29 - Resultados obtidos, em ensaios de coagulação-floculação-flotação e coagulação-floculação-sedimentação realizados no reator estático, em função da variação da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação. Dosagens de sulfato de alumínio - DSA- testadas: 20, 25, 30, 40, 50, 60 e 70 mg/L; pH de coagulação: entre 5,2 e 7,2. Ensaios de coagulação-floculação-flotação: velocidade de flotação:  $V_f = 16,25$  cm/min; pressão de saturação: 441 kPa; fração de recirculação: 8% (em volume). Ensaios de coagulação-floculação-sedimentação: velocidade de sedimentação:  $V_s = 1,5$  cm/min. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT, temperatura:  $21,7 \pm 1,5$  °C.

DSA (mg/L)	Flotação: velocidade de flotação= 16,25 cm/min								Sedimentação: velocidade de sedimentação= 1,5 cm/min							
	Dosagem de barrilha (mg/L)	Dosagem de ácido clorídrico (mL/L)*	pH após mistura rápida	Temperatura após mistura rápida (°C)	Remanescente		Remoção (%)		Dosagem de barrilha (mg/L)	Dosagem de ácido clorídrico (mL/L)*	pH após mistura rápida	Temperatura após mistura rápida (°C)	Remanescente		Remoção (%)	
					Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez					Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Cor aparente	Turbidez
60	50,0	-	6,89	22,2	62	1,63	76,2	64,9	50,0	-	6,90	21,8	191	5,67	27,3	-21,9
70	5,0	-	5,37	22,7	293	15,4	-11,4	-232,1	7,5	-	5,62	22,4	283	11,00	-7,7	-136,6
70	17,5	-	6,06	22,3	177	2,61	32,6	43,8	17,5	-	6,11	22,2	225	7,93	14,5	-70,5
70	27,5	-	6,28	22,4	15	0,57	94,1	87,7	37,5	-	6,49	22,1	156	4,72	40,5	-1,5
70	47,5	-	6,66	23,1	25	0,81	90,4	82,6	47,5	-	6,73	22,6	157	4,51	40,3	3,0
70	7,5	-	6,85	22,8	42	1,05	84,1	77,5	57,5	-	6,88	22,6	193	5,47	26,7	-17,6
70	67,5	-	7,18	22,3	269	7,87	-2,2	-69,3	67,5	-	7,16	22,3	283	7,82	-7,7	-68,2

\* Dosagem da solução de HCl preparada a 0,5%.

TABELA 30 - Resultados obtidos, em ensaios de coagulação-floculação-flotação e coagulação-floculação sedimentação realizados no reator estático, em função da variação da velocidade de flotação e velocidade de sedimentação, para diferentes valores de dosagem de sulfato de alumínio - DSA- com seus respectivos valores ótimos de pH de coagulação. Ensaio de coagulação-floculação-flotação: pressão de saturação: 441 kPa; fração de recirculação: 8% (em volume). Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT, temperatura: 21,7 ± 1,5 °C.

DSA (mg/L)	Flotação						Sedimentação					
	Dosagem de barrilha (mg/L)	Dosagem ácido clorídrico(mL/L)	pH após mistura rápida	Velocidade de flotação	Fração remanes. cor apar. (C/C0)	Remoção de cor aparente (%)**	Dosagem de barrilha (mg/L)	Dosagem ácido clorídrico(mL/L)	pH após mistura rápida	Velocidade de sedim. (cm/min)	Fração remanes. cor apar. (C/C0)	Remoção de cor aparente (%)**
25	-	2	6,07	50,0	1,15	57,7	-	1,25	6,30	10,9	0,91	19,8
				30,0	0,39	80,9				9,6	0,89	21,2
				20,0	0,22	86,6				8,6	0,89	22,4
				15,0	0,15	88,3				7,7	0,88	23,6
				12,0	0,14	89,1				4,0	0,84	33,0
				8,0	0,11	89,7				2,6	0,79	40,3
				4,0	0,10	89,9				1,3	0,65	52,7
				-	-	-				0,3	0,37	63,2
30	2,5	-	6,40	50,0	1,09	59,0	-	-	6,31	10,9	0,83	32,2
				30,0	0,37	80,3				9,6	0,83	34,3
				20,0	0,26	86,1				8,6	0,77	35,9
				15,0	0,16	88,4				7,7	0,76	37,3
				12,0	0,15	89,3				4,0	0,75	49,6
				8,0	0,11	90,3				2,6	0,58	57,7
				4,0	0,09	90,7				1,3	0,44	66,5
				-	-	-				0,3	0,27	73,0
50	15	-	6,48	50,0	1,19	57,1	15	-	6,43	10,9	0,75	35,9
				30,0	0,45	83,0				9,6	0,74	37,3
				20,0	0,18	90,3				8,6	0,74	38,7
				15,0	0,12	92,0				7,7	0,72	40,0
				12,0	0,09	92,5				4,0	0,69	49,8
				8,0	0,08	92,8				2,6	0,56	56,1
				4,0	0,07	93,0				1,3	0,50	65,2
				-	-	-				0,3	0,26	74,2
70	27,5	-	6,39	50,0	0,96	69,2	-	-	-	-	-	-
				30,0	0,23	88,3	-	-	-	-	-	-
				20,0	0,15	91,7	-	-	-	-	-	-
				15,0	0,10	93,1	-	-	-	-	-	-
				12,0	0,08	93,7	-	-	-	-	-	-
				8,0	0,06	94,3	-	-	-	-	-	-
				4,0	0,05	94,5	-	-	-	-	-	-

\*Dosagem da solução de HCl preparada a 0,5%.

\*\*Foi levada em conta a remoção da fração de flocos flutuando com velocidade menor que a considerada.

TABELA 31 - Resultados obtidos, em ensaios de coagulação-floculação-flotação realizados no reator estático, em função da variação da fração de recirculação e velocidade de flotação, para dosagem de sulfato de alumínio -DSA- de 30 mg/L e 70 mg/L, com seus respectivos valores ótimos de pH de coagulação. Pressão de saturação: 441 kPa. Características da água de estudo: cor aparente: 263 uC; turbidez: 4,65 uT, temperatura: 21,7 ± 1,5 °C.

Fração de recirculação (%)	Velocidade de flotação (cm/min)	DSA= 30 mg/L				DSA= 70 mg/L			
		Dosagem de barrilha (mg/L)	pH após mistura rápida	Fração remanescente de cor aparente (C/CO)	Remoção de cor aparente (%)*	Dosagem de barrilha (mg/L)	pH após mistura rápida	Fração remanescente de cor aparente (C/CO)	Remoção de cor aparente (%)*
5	50,0	2,5	6,36	1,22	46,7	25,0	6,29	1,03	59,9
	30,0			0,65	73,5			0,38	80,2
	20,0			0,29	83,8			0,24	85,8
	15,0			0,19	86,5			0,17	88,0
	12,0			0,16	87,5			0,14	88,9
	8,0			0,13	88,6			0,12	89,8
	4,0			0,11	89,2			0,10	90,4
8	50,0	-	6,40	1,09	59,0	27,5	6,39	0,96	69,2
	30,0			0,37	80,3			0,23	88,3
	20,0			0,26	86,1			0,15	91,7
	15,0			0,16	88,4			0,10	93,1
	12,0			0,15	89,3			0,08	93,7
	8,0			0,11	90,3			0,06	94,3
	4,0			0,09	90,7			0,05	94,5
11	50,0	2,5	6,34	1,11	60,0	25,0	6,28	0,84	68,3
	30,0			0,39	83,4			0,30	85,4
	20,0			0,17	89,1			0,16	89,7
	15,0			0,12	90,4			0,10	90,7
	12,0			0,10	90,7			0,10	91,0
	8,0			0,09	90,9			0,09	91,2
	4,0			0,09	91,1			0,09	91,3
14	50,0	2,5	6,31	1,07	60,8	25,0	6,29	0,90	70,9
	30,0			0,39	83,3			0,23	89,4
	20,0			0,17	89,1			0,10	92,5
	15,0			0,12	90,3			0,08	93,1
	12,0			0,10	90,7			0,07	93,4
	8,0			0,10	91,1			0,06	93,5
	4,0			0,09	91,4			0,06	93,5

\*Foi levada em conta a remoção da fração de flocos flotando com velocidade menor que a considerada.

## **Apêndice 4a**

Resumo com as características gerais de cada carreira de operação realizada na  
instalação com escoamento contínuo para a água tipo II

## Características gerais da carreira de operação 1: ensaios A, B, C e D

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	-	6,87	-
Temperatura (°C)	-	24,5	-
Cor aparente (uC)	-	271	-
Cor verdadeira (uC)	-	233	-
Turbidez (uT)	-	4,56	-
Condutividade (µmho/cm)	-	64,6	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	-	34	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	-	24	-
SST (mg/L)	-	4,4	32,5
SSF (mg/L)	-	1,6	17,5
SSV (mg/L)	-	2,8	15,0

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

Tmr: 20 seg; Gmr: 1100 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (8 min em cada gradiente); Gf: 100 s<sup>-1</sup>, Gf: 80 s<sup>-1</sup> e 60 s<sup>-1</sup>; P<sub>z</sub> 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2
DSA (mg/L)	70	70
Dos. barrilha (mg/L)	25	37,5
pH de coagulação	6,17	6,42
Temperatura (°C)	24,5	24,5
Cor apar. (uC)	Vf=20 cm/min	37
	Vf=10 cm/min	11
Turbidez (uT)	Vf=20 cm/min	1,34
	Vf=10 cm/min	0,77

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de coagulação	6,34 ± 0,17
Vazão afluyente da água de estudo (L/h)	850
Concentração da solução de sulfato (%)	0,28
Vazão da solução de sulfato (L/h)	21,4
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	29
Concentração da solução de barrilha (%)	0,27
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	9,0

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreram pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio C	Ensaio D
DSA (mg/L)	70	70	70	70
Nº de câmaras de floc.	3	3	3	3
Tempo teórico de floc. (min)	24	24	24	24
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	100	100	100	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	80	80	80	60
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	60	60	60	40
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	558	568	542 ± 1	542 ± 1
Vplacas (cm/min)	49	50	47	47
Reynolds entre as placas	572	582	556 ± 1	556 ± 1
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	6,31 ± 0,03	7,91 ± 0,04	3,84 ± 0,18	3,84 ± 0,18

## Características gerais da carreira de operação 2: ensaios E, F e G

### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	-	6,50	-
Temperatura (°C)	-	24,5	-
Cor aparente (uC)	-	281	-
Cor verdadeira (uC)	-	237	-
Turbidez (uT)	-	5,07	-
Condutividade ( $\mu\text{mho/cm}$ )	52,1	52,1	-
Alcalinidade (mg/L $\text{CaCO}_3$ )	28	32	-
Dureza (mg/L $\text{CaCO}_3$ )	16	16	-
SST (mg/L)	-	3,3	33,0
SSF (mg/L)	-	0,5	21,5
SSV (mg/L)	-	2,8	11,5

### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

Tmr: 20 seg; Gmr: 1100  $\text{s}^{-1}$ ; Tf: 24 min (8 min em cada gradiente); Gf: 70  $\text{s}^{-1}$ , Gf: 50  $\text{s}^{-1}$  e 30  $\text{s}^{-1}$ ; P $\approx$  441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3	jarro 4
DSA (mg/L)	70	70	50	50
Dos. barrilha (mg/L)	25	30	20	25
pH de coagulação	6,29	6,34	6,38	6,49
Temperatura (°C)	24,4	24,3	24,2	24,3
Cor apar. (uC)	Vf=20 cm/min	44	33	59
	Vf=10 cm/min	11	12	14
Turbidez (uT)	Vf=20 cm/min	1,36	1,20	3,21
	Vf=10 cm/min	0,35	0,39	0,62

### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de coagulação	6,38 $\pm$ 0,08 (Ensaio E e Ensaio F) e 6,43 $\pm$ 0,17 (Ensaio G)
Vazão afluyente da água estudo (L/h)	850
Concentração da solução de sulfato (%)	0,28
Vazão da solução de sulfato (L/h)	21,6 (Ensaio E e Ensaio F) e 15,5 (Ensaio G)
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	34,4 (Ensaio E e Ensaio F) e 28,1 (Ensaio G)
Concentração da solução de barrilha (%)	0,27
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	10,4 (Ensaio E e Ensaio F) e 8,5 (Ensaio G)

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreram pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio E	Ensaio F	Ensaio G
DSA (mg/L)	70	70	50
Nº de câmaras de floc.	3	3	3
Tempo teórico de floc. (min)	24	24	24
Gf na 1ª câmara ( $\text{s}^{-1}$ )	80	70	70
Gf na 2ª câmara ( $\text{s}^{-1}$ )	60	50	50
Gf na 3ª câmara ( $\text{s}^{-1}$ )	40	30	30
TAS aparente ( $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$ )	366	366	363
Vplacas (cm/min)	32	32	32
Reynolds entre as placas	375	375	372
Sp*p (g de ar/ $\text{m}^3$ de água)	4,58 $\pm$ 0,11	4,58 $\pm$ 0,11	4,58 $\pm$ 0,11

### Características gerais da carreira de operação 3: ensaios H, I e J

#### a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	-	6,24	-
Temperatura (°C)	-	26,5	-
Cor aparente (uC)	-	258	-
Cor verdadeira (uC)	-	241	-
Turbidez (uT)	-	4,65	-
Condutividade (µmho/cm)	-	59,8	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	-	32	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	-	22	-
SST (mg/L)	-	-	34,0
SSF (mg/L)	-	-	18,5
SSV (mg/L)	-	-	15,5

#### b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatete.

Tmr: 20 seg; Gmr: 1100 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (8 min em cada gradiente); Gf: 70 s<sup>-1</sup>, Gf: 50 s<sup>-1</sup> e 30 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2
DSA (mg/L)	50	50
Dos. barrilha (mg/L)	0	15
pH de coagulação	6,3	6,4
Temperatura (°C)	25,8	25,5
Cor apar. (uC)	Vf=20 cm/min	40
	Vf=10 cm/min	18
Turbidez (uT)	Vf=20 cm/min	1,38
	Vf=10 cm/min	0,62

#### c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de coagulação	6,34 ± 0,09
Vazão afluyente da água estudo (L/h)	850
Concentração da solução de sulfato (%)	0,28
Vazão da solução de sulfato (L/h)	15,2
Dosagem de barrilha (mg/L) *, aproximada	25
Concentração da solução de barrilha (%)	0,25
Vazão da solução de barrilha (L/h) *	8,64

\* ao longo do tempo de operação da instalação com escoamento contínuo ocorreram pequenos ajustes da vazão da solução de barrilha para manter o pH de coagulação.

#### d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio H	Ensaio I	Ensaio J
DSA (mg/L)	50	50	50
Nº de câmaras de floc.	3	3	3
Tempo teórico de floc.(min)	24	24	24
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	70	70	70
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	50	50	50
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	30	30	30
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	273	279	270
Vplacas (cm/min)	24	24	24
Reynolds entre as placas	280	286	277
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	4,98 ± 0,05	6,61 ± 0,04	4,03 ± 0,1

Características gerais da carreira de operação 4: ensaios L, M, N e O

a) Caracterização da água utilizada e água floculada

Características	Água do poço	Água de estudo	Água floculada
pH	6,30	6,97	-
Temperatura (°C)	25,3	25,5	-
Cor aparente (uC)	3	263	-
Cor verdadeira (uC)	-	244	-
Turbidez (uT)	0,28	4,10	8,35 ± 1,01
Condutividade (µmho/cm)	47,4	49,3	-
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	28	29	-
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	16	16	-
SST (mg/L)	-	2,7	23,0
SSF (mg/L)	-	-	-
SSV (mg/L)	-	-	-

b) Resultados dos testes de coagulação-floculação-flotação realizados no flotatesto.

Tmr: 20 seg; Gmr: 1100 s<sup>-1</sup>; Tf: 24 min (8 min em cada gradiente); Gf: 70 s<sup>-1</sup>, Gf: 50 s<sup>-1</sup> e 30 s<sup>-1</sup>; P≅ 441 kPa; recirculação: 8% (em volume).

Parâmetros variados	jarro 1	jarro 2	jarro 3	jarro 4	
DSA (mg/L)	30	30	30	30	
Dos. barrilha (mg/L)	-	2,5	-	-	
Dos. ácido clorídrico (mL/L)*	-	-	0,5	1	
pH de coagulação	6,44	6,5	6,33	6,23	
Temperatura (°C)	24,8	24,7	24,5	25,1	
Cor apar.	Vf=20 cm/min	79	56	52	46
(uC)	Vf=10 cm/min	23	23	15	16
Turbidez	Vf=20 cm/min	2,18	1,43	1,48	1,23
(uT)	Vf=10 cm/min	0,43	0,44	0,48	0,44

\* Dosagem da solução de ácido clorídrico a 0,5%.

c) Parâmetros operacionais utilizados na instalação com escoamento contínuo:

pH de cagulação	6,34 ± 0,09
Vazão afluyente da água estudo (L/h)	850
Concentração da solução de sulfato (%)	0,25
Vazão da solução de sulfato (L/h)	10,2
Dosagem de barrilha (mg/L)	-
Concentração da solução de barrilha (%)	-
Vazão da solução de barrilha (L/h)	0

d) Variáveis investigadas na instalação com escoamento contínuo:

Variáveis	Ensaio L	Ensaio M	Ensaio N	Ensaio O
DSA (mg/L)	30	30	30	30
Nº de câmaras de floc.	3	3	3	3
Tempo teórico de floc. (min)	24	24	24	24
Gf na 1ª câmara (s <sup>-1</sup> )	70	70	80	80
Gf na 2ª câmara (s <sup>-1</sup> )	50	50	60	60
Gf na 3ª câmara (s <sup>-1</sup> )	30	30	40	60
TAS aparente (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	269	266	266	266
Vplacas (cm/min)	23	23	23	23
Reynolds entre as placas	276	273	273	273
Sp*p (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	4,96 ± 0,04	4,14 ± 0,07	4,14 ± 0,07	4,14 ± 0,07

## **Apêndice 4b**

Tabelas referentes aos resultados das carreiras de operação realizadas na instalação  
com escoamento contínuo para a água tipo II

TABELA 32 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 1 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 124).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*P (g ar/ m³ água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot. (m³/m³d)	Vplacas (cm/min)	Nº de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
A	70	441	1,142	6,34	6,50	25,1	558	49	572	77	71,5	-	-	2,75	39,7	6,2	80,9	-	-	-	-
A	85	441	1,142	6,32	6,30	25,2	558	49	572	69	74,7	-	-	2,69	41,0	7,0	78,5	-	-	-	-
A	100	441	1,145	6,33	6,29	25,3	558	49	572	64	76,2	-	-	2,47	45,8	4,6	85,9	-	-	-	-
A	115	441	1,135	6,27	6,34	25,3	558	49	572	72	73,5	-	-	2,68	41,2	9,7	70,3	-	-	-	-
A	130	441	1,142	6,31	6,35	25,3	558	49	572	80	70,5	15	93,6	2,97	34,9	7,8	75,9	4,8	72,4	3,0	80,0
B	145	441	1,425	7,87	6,24	25,3	568	50	583	80	70,6	-	-	2,93	35,7	7,7	76,4	-	-	-	-
B	160	451	1,408	7,95	6,17	25,3	568	49	582	88	67,3	-	-	2,88	36,8	9,0	72,3	-	-	-	-
B	175	441	1,428	7,89	6,43	25,3	568	50	583	86	68,3	-	-	2,98	34,6	9,0	72,3	-	-	-	-
C	190	441	0,715	3,95	6,42	25,3	543	47	557	57	78,8	-	-	1,91	58,1	4,7	85,6	-	-	-	-
C	205	441	0,728	4,02	6,41	25,3	544	47	557	53	80,4	-	-	1,72	62,3	4,0	87,7	-	-	-	-
C	220	441	0,704	3,89	6,42	25,3	543	47	556	71	73,7	-	-	2,22	51,3	7,0	78,5	-	-	-	-
C	235	441	0,712	3,93	6,41	25,3	543	47	557	61	77,5	-	-	1,95	57,2	5,7	82,6	-	-	-	-
C	250	441	0,717	3,96	6,40	25,3	543	47	557	78	71,1	-	-	2,33	48,9	6,5	80,1	-	-	-	-
D	265	441	0,663	3,66	6,41	25,3	541	47	555	76	72,1	-	-	2,39	47,6	5,9	82,0	-	-	-	-
D	280	441	0,720	3,98	6,41	25,3	543	47	557	61	77,3	-	-	1,95	57,2	5,7	82,6	-	-	-	-
D	295	441	0,715	3,95	6,43	25,3	543	47	557	56	79,3	-	-	1,70	62,7	7,3	77,4	-	-	-	-
D	310	441	0,683	3,77	6,45	25,3	542	47	556	61	77,5	-	-	1,99	56,4	6,0	81,5	-	-	-	-

TABELA 33 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 2 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 125).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*P (g ar/ m <sup>3</sup> água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot.(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	Vplacas (cm/min)	N° de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
E	75	441	0,865	4,65	6,30	26,5	366	32	376	58	79,2	-	-	1,93	61,9	5,3	84,1	-	-	-	-
E	90	441	0,855	4,58	6,34	26,6	366	32	375	52	81,6	-	-	1,68	66,9	5,0	84,8	-	-	-	-
E	105	441	0,840	4,49	6,36	26,7	366	32	375	51	81,8	-	-	1,60	68,4	5,5	83,3	-	-	-	-
E	120	441	0,860	4,60	6,32	26,7	366	32	375	48	82,9	-	-	1,46	71,2	4,5	86,4	-	-	-	-
E	135	441	0,838	4,47	6,32	26,8	366	32	375	63	77,5	-	-	1,96	61,3	6,0	81,8	-	-	-	-
E	150	441	0,867	4,62	6,40	26,8	366	32	376	49	82,6	25	89,7	1,57	69,0	4,9	85,2	2,7	87,2	2,1	81,5
F	165	441	0,861	4,59	6,46	26,8	366	32	375	44	84,4	-	-	1,42	72,0	4,5	86,4	-	-	-	-
F	180	441	0,863	4,60	6,40	26,8	366	32	375	47	83,2	-	-	1,52	70,0	4,8	85,3	-	-	-	-
F	195	441	0,843	4,49	6,41	26,9	366	32	375	45	84,0	-	-	1,36	73,2	4,9	85,3	-	-	-	-
F	210	441	0,870	4,62	6,38	27,0	366	32	376	45	84,1	-	-	1,40	72,4	4,9	85,3	-	-	-	-
F	225	446	0,871	4,69	6,41	26,9	366	32	376	49	82,5	-	-	1,52	70,0	5,4	83,5	-	-	-	-
F	240	441	0,865	4,60	6,35	26,9	366	32	376	53	81,0	31	86,8	1,66	67,3	5,6	83,0	3,5	83,7	2,1	81,5
G	255	441	0,864	4,60	6,26	26,9	363	32	372	48	82,9	-	-	1,72	66,1	5,0	84,8	-	-	-	-
G	270	441	0,861	4,59	6,37	26,8	363	32	372	53	81,0	-	-	1,67	67,1	5,5	83,3	-	-	-	-
G	285	441	0,868	4,62	6,36	26,9	363	32	372	55	80,4	-	-	1,67	67,1	6,2	81,4	-	-	-	-
G	300	441	0,877	4,67	6,59	26,9	363	32	373	48	82,9	-	-	1,46	71,2	4,4	86,5	-	-	-	-
G	315	436	0,862	4,55	6,48	26,8	363	32	372	45	84,1	-	-	1,32	74,0	4,5	86,4	-	-	-	-
G	330	441	0,837	4,46	6,47	26,8	362	32	372	51	81,7	16	93,2	1,54	69,6	5,0	84,8	2,5	88,4	2,5	78,3

TABELA 34 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 3 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 126).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m³ água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot. (m³/m²d)	Vplacas (cm/min)	N° de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
H	85	441	0,929	5,03	6,38	26,6	273	24	280	72	72,1	-	-	2,35	49,5	5,0	85,3	-	-	-	-
H	100	441	0,932	5,03	6,33	26,7	273	24	280	59	77,2	-	-	1,92	58,7	5,0	85,3	-	-	-	-
H	115	441	0,915	4,95	6,37	26,6	273	24	280	51	80,1	-	-	1,68	63,9	3,5	89,7	-	-	-	-
H	130	441	0,915	4,94	6,36	26,7	273	24	280	49	81,0	-	-	1,62	65,2	4,0	88,2	-	-	-	-
H	145	441	0,927	5,00	6,42	26,7	273	24	280	51	80,3	-	-	1,60	65,6	4,5	86,8	-	-	-	-
H	160	441	0,917	4,94	6,38	26,8	273	24	280	51	80,4	-	-	1,61	65,4	3,8	89,0	-	-	-	-
H	175	441	0,920	4,95	6,41	26,8	273	24	280	46	82,3	21	91,2	1,60	65,6	4,2	87,6	1,7	91,0	2,6	83,5
I	190	441	1,235	6,65	6,36	26,8	279	24	286	59	77,0	-	-	1,90	59,1	5,6	83,5	-	-	-	-
I	205	441	1,227	6,59	6,32	26,9	279	24	286	55	78,5	-	-	1,80	61,3	5,4	84,2	-	-	-	-
I	220	441	1,230	6,58	6,39	27,1	279	24	286	59	77,3	-	-	1,90	59,1	5,7	83,3	-	-	-	-
I	235	441	1,228	6,58	6,38	27,0	279	24	286	61	76,3	-	-	2,00	57,0	5,9	82,7	-	-	-	-
J	250	441	0,755	4,04	6,37	27,1	270	24	277	40	84,4	-	-	1,34	71,2	3,8	89,0	-	-	-	-
J	265	441	0,734	3,93	6,31	27,1	270	24	277	43	83,5	-	-	1,40	69,9	3,8	89,0	-	-	-	-
J	280	456	0,747	4,13	6,37	27,1	270	24	277	30	88,5	-	-	0,96	79,4	3,4	89,9	-	-	-	-
J	295	441	0,755	4,05	6,34	27,0	270	24	277	27	89,5	-	-	0,98	78,9	1,6	95,2	-	-	-	-
J	310	441	0,740	3,97	6,38	27,0	270	24	277	44	82,8	-	-	1,36	70,8	3,8	88,9	-	-	-	-
J	325	441	0,754	4,03	6,25	27,1	270	24	277	25	90,4	20	91,9	0,87	81,3	3,1	90,8	1,3	92,8	1,8	88,5

TABELA 35 - Resumo dos resultados obtidos durante a carreira de operação 4 da instalação com escoamento contínuo (ver figura 127).

Ensaio	Tempo (min)	Pressão sat. (kPa)	Vazão recirc. (L/min)	Sp*p (g ar/ m³ água)	pH após mistura ráp.	Temperatura (°C)	TASap câm. flot.(m³/m²d)	Vplacas (cm/min)	Nº de Reynolds	Cor apar. efl.		Cor verd. efl.		Turb. efl.		SST efl.		SSF efl.		SSV efl.	
										Cor (uC)	Remoção (%)	Cor (uC)	Remoção (%)	Turbidez (uT)	Remoção (%)	SST (mg/L)	Remoção (%)	SSF (mg/L)	Remoção (%)	SSV (mg/L)	Remoção (%)
L	70	441	0,894	4,93	6,39	26,4	269	23	276	70	73,6	-	-	1,98	51,7	2,7	88,4	-	-	-	-
L	85	441	0,895	4,92	6,31	26,6	269	23	276	50	81,0	-	-	1,31	68,0	2,0	91,3	-	-	-	-
L	100	441	0,908	4,99	6,31	26,6	269	23	276	43	83,8	-	-	1,03	74,9	1,4	93,8	-	-	-	-
L	115	441	0,903	4,95	6,24	26,7	269	23	276	40	84,8	-	-	1,04	74,6	1,7	92,5	-	-	-	-
L	130	441	0,911	5,01	6,29	26,6	269	23	276	39	85,2	27	88,8	0,91	77,8	2,5	89,1	-228,3	75,1	230,8	75,4
M	145	451	0,747	4,21	6,31	26,5	266	23	273	37	85,9	-	-	1,02	75,1	1,1	95,0	-	-	-	-
M	160	441	0,745	4,10	6,34	26,5	266	23	273	41	84,2	-	-	1,16	71,7	2,3	90,1	-	-	-	-
M	175	441	0,751	4,13	6,37	26,6	266	23	273	35	86,9	-	-	0,98	76,1	1,8	92,2	-	-	-	-
M	190	441	0,754	4,15	6,37	26,5	266	23	273	38	85,6	-	-	0,98	76,1	2,3	90,1	-	-	-	-
M	205	451	0,725	4,08	6,37	26,5	266	23	273	33	87,5	25	89,8	0,84	79,5	2,5	89,1	-231,6	74,7	234,1	75,0
N	220	441	0,753	4,16	6,36	26,4	266	23	273	39	85,1	-	-	1,07	73,9	2,4	89,5	-	-	-	-
N	235	441	0,760	4,19	6,36	26,5	266	23	273	35	86,9	-	-	0,81	80,2	1,7	92,5	-	-	-	-
N	250	441	0,764	4,21	6,34	26,5	266	23	273	36	86,3	-	-	0,90	78,0	1,7	92,5	-	-	-	-
N	265	441	0,738	4,07	6,32	26,4	266	23	273	37	85,8	-	-	0,90	78,0	2,5	89,1	-	-	-	-
N	280	441	0,759	4,19	6,34	26,4	266	23	273	34	87,0	25	89,6	0,80	80,5	2,1	90,8	-228,4	75,0	230,5	75,4
O	295	441	0,757	4,18	6,35	26,4	266	23	273	44	83,1	-	-	1,11	72,9	1,4	94,0	-	-	-	-
O	310	436	0,748	4,09	6,43	26,3	266	23	273	42	84,1	-	-	1,08	73,7	3,4	85,1	-	-	-	-
O	325	441	0,754	4,17	6,33	26,3	266	23	273	39	85,1	-	-	0,99	75,9	2,5	89,1	-	-	-	-
O	340	436	0,747	4,09	6,35	26,3	266	23	273	41	84,3	-	-	1,06	74,1	1,6	92,9	-	-	-	-
O	355	441	0,755	4,19	6,32	26,2	266	23	273	39	85,3	30	87,6	1,02	75,1	2,3	90,2	-228,4	75,0	230,6	75,4

## **Apêndice 5**

Fator de correção teórico para cálculo da solubilidade de ar em função da variação da temperatura

Fator de correção teórico (f) para cálculo da solubilidade de ar em função da variação da temperatura para pressão de 441 kPa , de acordo com WEAST (1989).

Temp. (°C)	f
25,0	1,00000
25,1	0,99782
25,2	0,99564
25,3	0,99346
25,4	0,99128
25,5	0,98910
25,6	0,98691
25,7	0,98473
25,8	0,98255
25,9	0,98037
26,0	0,97819
26,1	0,97601
26,2	0,97383
26,3	0,97165
26,4	0,96947
26,5	0,96729
26,6	0,96510
26,7	0,96292
26,8	0,96074
26,9	0,95856
27,0	0,95638
27,1	0,95420
27,2	0,95202
27,3	0,94984
27,4	0,94766
27,5	0,94548
27,6	0,94330
27,7	0,94111
27,8	0,93893
27,9	0,93675
28,0	0,93457
28,1	0,93239
28,2	0,93021
28,3	0,92803
28,4	0,92585
28,5	0,92367