



## Campus de São Carlos

FLOTAÇÃO DE ALTA TAXA APLICADA AO  
PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES DE  
REATORES ANAERÓBIOS

MARCELO EUSTÁQUIO DE CARVALHO

Orientador: Prof. Dr. MARCO ANTONIO PENALVA REALI

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



ESCOLA DE ENGENHARIA  
DE SÃO CARLOS

# FLOTAÇÃO DE ALTA TAXA APLICADA AO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REATORES ANAERÓBIOS

Eng. Civil MARCELO EUSTÁQUIO DE CARVALHO

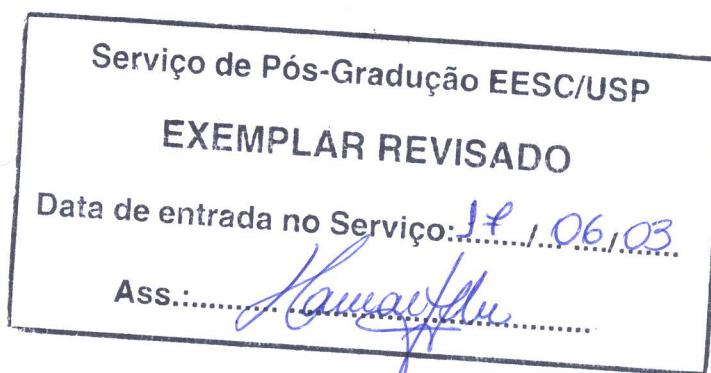
DEDALUS - Acervo - EESC



31100043527

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali



São Carlos



Cass. TESE  
Cult. 1314

Tombo T203|03  
Sysno 1324801

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

C331f Carvalho, Marcelo Eustáquio de  
Flotação de alta taxa aplicada ao pós-tratamento de  
efluentes de reatores anaeróbios / Marcelo Eustáquio de  
Carvalho. -- São Carlos, 2003.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.

Área: Hidráulica e Saneamento.

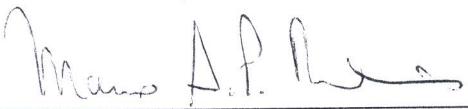
Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali.

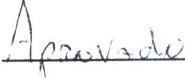
1. Flotação de alta taxa.
2. Pós-tratamento de reator anaeróbio.
3. Remoção de fósforo por flotação.
4. Tratamento de esgoto. I. Título.

## **FOLHA DE JULGAMENTO**

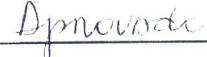
Candidato: Engenheiro **MARCELO EUSTAQUIO DE CARVALHO**

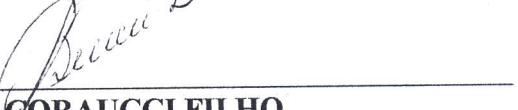
Dissertação defendida e julgada em 06-06-2003 perante a Comissão Julgadora:

  
Prof. Dr. **MARCO ANTONIO PENALVA REALI** (Orientador)  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

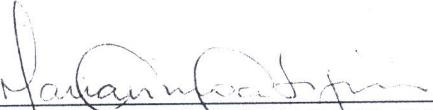
  
Aprovado

  
Profa. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

  
Aprovado

  
Prof. Dr. **BRUNO CORAUCCI FILHO**  
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

  
Aprovado

  
Profa. Associada **MARIA DO CARMO CALIJURI**  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia (Hidráulica e Saneamento) e  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Aos meus Pais Délcio e Vanda (*in Memoriam*)  
e às minhas irmãs Verônica e Marcinha pelo  
amor, carinho, apoio e compreensão em  
todos os momentos dessa caminhada

## Agradecimentos

Ao Prof Dr. Marco Antonio Penalva Reali pelos ensinamentos, confiança e fundamental orientação no desenvolvimento da pesquisa.

Ao Prof. Titular José Roberto Campos, pelas sugestões apontadas para elaboração do trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcelo Zait, pelo pronto atendimento e ajuda nas soluções de problemas.

Em especial à minha namorada Luci Any, pelo amor, carinho, compreensão, ajuda e principalmente por estando longe de minha família me amparar nos momentos mais difíceis dessa jornada.

À amiga e colega de pesquisa Renata, pela parceria e pronta ajuda no laboratório.

À técnica do LATAR Ana Paula, pela atenção e ajuda.

Aos funcionários da seção de veículos da EESC, em especial ao motorista Ananias (Naná) pela colaboração e presteza.

Aos funcionários e técnicos do departamento de hidráulica e saneamento, pela gentileza e pelo atendimento.

A todos os amigos e colegas do programa de mestrado pela ajuda, colaboração e companheirismo.

Ao meu Pai, de maneira muito especial, pelo carinho, amor, apoio e por me ensinar que a educação é a maior riqueza de um homem.

À minha irmã Marcinha, que mesmo estando longe, sempre me apoiou e foi sem dúvida uma grande incentivadora.

À minha irmã Verônica, meu cunhado Miguel e minha sobrinha Ana Carolina, que sempre estiveram ao meu lado e que me acolheram nos momentos de descanso.

À minha Tia Fátima pelo carinho e amor e principalmente por ser hoje mais do que minha Tia Fátima.

À todos os meus familiares, pelo apoio e carinho.

À Fapesp pela bolsa de estudo concedida.

*“É na educação dos filhos que se revelam as virtudes dos Pais”*

(Coelho Neto, escritor brasileiro)

---

# SUMÁRIO

Lista de FIGURAS.....	i
Lista de TABELAS.....	ii
Lista de GRÁFICOS.....	iv
Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos.....	xiv
Resumo.....	xv
Abstract.....	xvi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	4
3.1 FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO (FAD).....	4
3.2 Aplicação da FAD no Tratamento de Águas Residuárias como Pós-tratamento de Reatores Anaeróbios e de Sistemas Sequenciais de Tratamento (anaeróbio/aeróbio).....	5
3.3 Unidades Modernas de Flotação por Ar Dissolvido (Unidades de Terceira Geração) .....	7
3.4 Alguns Aspectos Teóricos da Coagulação/Flocação em Tratamento de Águas Residuárias.....	11
3.5 Remoção de Fósforo.....	13
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
4.1 Considerações Iniciais.....	17
4.2 Descrição das Instalações Utilizadas.....	19
4.2.1 Instalação piloto de coagulação/flocação/flotação por ar dissolvido de alta taxa, com escoamento contínuo (FADAT) .....	19

4.2.2	Cálculo de alguns parâmetros utilizados nos ensaios.....	26
4.2.3	Descrição dos Principais Equipamentos Acessórios.....	27
4.2.4	Reator Anaeróbio de Leito Expandido (RALEX).....	27
4.3	Outros equipamentos e materiais utilizados.....	28
4.4	Caracterização fisico-química simplificada do esgoto bruto e do efluente do Ralex ao longo de 24 horas.....	29
4.5	Ensaios Visando a Caracterização do Desempenho da Câmara de Saturação do Sistema de Flotação.....	30
4.6	Ensaios realizados com a instalação piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa (FADAT).....	33
4.7	Operação e Manutenção das Instalações de Pesquisa.....	36
4.7.1	Monitoramento do reator anaeróbio RALEX.....	36
4.7.2	Procedimento e monitoramento dos ensaios na instalação piloto de flotação (FADAT).....	36
4.8	Caracterização fisico-química das amostras.....	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
5.1	Resultados da Caracterização fisico-química simplificada do esgoto bruto e do efluente do RALEX ao longo de 24 horas.....	40
5.2	Comentários à cerca do desempenho do Reator Anaeróbio de Leito Expandido (Ralex), durante o período de estudo (Somente com base na DQO) .....	43
5.3	Resultados Obtidos no Estudo da Eficiência da Câmara de Saturação.....	44
5.4	Resultados dos ensaios realizados utilizando unidade piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa (FADAT) .....	48
5.4.1	Resultados dos ensaios com taxa de aplicação superficial de 21m/h.....	49
5.4.1.1	Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo,utilizando DCF de 50 mg/L, G <sub>f</sub> de 60 s <sup>-1</sup> ....	50
5.4.1.2	Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo,utilizando DCF de 50 mg/L, G <sub>f</sub> de 80 s <sup>-1</sup> ....	57

5.4.1.3	Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo,utilizando DCF de 50 mg/L, G <sub>f</sub> de 100 s <sup>-1</sup> ..	64
5.4.1.4	Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo,utilizando DCF de 70 mg/L, G <sub>f</sub> de 80 s <sup>-1</sup> ....	71
5.4.1.5	Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo,utilizando DCF de 70 mg/L, G <sub>f</sub> de 100 s <sup>-1</sup> ..	78
5.4.2	Resultados dos ensaios com taxa de aplicação superficial de 42m/h.....	85
5.4.2.1	Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo,utilizando DCF de 50 mg/L, G <sub>f</sub> de 80 s <sup>-1</sup> ....	86
5.4.2.2	Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo,utilizando DCF de 50 mg/L, G <sub>f</sub> de 100 s <sup>-1</sup> ..	93
5.4.2.3	Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo,utilizando DCF de 70 mg/L, G <sub>f</sub> de 80 s <sup>-1</sup> ..	100
5.4.2.4	Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo,utilizando DCF de 70 mg/L, G <sub>f</sub> de 100 s <sup>-1</sup>	107
5.4.3	Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo sem adição cloreto férrico.....	114
5.4.4	Comparação dos resultados dos ensaios realizados com a unidade de flotação por ar dissolvido FADAT.....	121
6	CONCLUSÕES.....	125

7 SUGESTÕES ..... 127

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 128

## **Lista de FIGURAS**

FIGURA 1	Esquema simplificado do sistema de tratamento seqüencial de esgoto sanitário, constituído de reator anaeróbio (Ralex) seguido de unidade de flotação de alta taxa (Adaptado de PENETRA, 2000).....	18
FIGURA 2	Fotografia de parte da unidade de floculação do flotador por ar dissolvido de alta taxa.....	20
FIGURA 3	Fotografia da parte superior da unidade de flotação.....	21
FIGURA 4	Fotografia do raspador mecânico de lodo.....	21
FIGURA 5	Fotografia da unidade de flotação por ar dissolvido de alta taxa.....	23
FIGURA 6	Esquema da unidade piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa e da câmara de saturação.....	24
FIGURA 7	Esquema em planta da unidade piloto FADAT e em corte e planta dos floculadores.....	25
FIGURA 8	Fotografia do reator anaeróbio de leito expandido (Ralex).....	28
FIGURA 9	Fluxograma dos ensaios realizados com a instalação piloto FADAT.....	35
FIGURA 10	Fluxograma dos ensaios realizados com a instalação piloto FADAT, utilizando taxa de aplicação superficial de 21m/h.....	49
FIGURA 11	Fluxograma dos ensaios realizados com a instalação piloto FADAT, utilizando taxa de aplicação superficial de 42m/h.....	85

## Lista de TABELAS

TABALA 1	Quantidade de ar na câmara de saturação ( $S_p$ ) para pressão de saturação ( $P_{sat}$ ) = $450 \pm 50$ kPa e temperatura de $23 \pm 1^\circ\text{C}$ .....	44
TABELA 2	Quantidade de ar fornecida para o flotador, para pressão de saturação ( $P_{sat}$ ) de 450 kPa e temperatura de $23 \pm 1^\circ\text{C}$ .....	47
TABELA 3.1	Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: $T_f = 20$ min.; $P_{sat} = 450$ kPa; $TAS = 21$ m/h; $DCF = 50$ mg/L; $G_f = 60$ $\text{s}^{-1}$ , $S^* = 8,1$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 3).....	56
TABELA 3.2	Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: $T_f = 20$ min.; $P_{sat} = 450$ kPa; $TAS = 21$ m/h; $DCF = 50$ mg/L; $G_f = 80$ $\text{s}^{-1}$ , $S^* = 8,1$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 3) .....	63
TABELA 3.3	Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: $T_f = 20$ min.; $P_{sat} = 450$ kPa; $TAS = 21$ m/h; $DCF = 50$ mg/L; $G_f = 100$ $\text{s}^{-1}$ , $S^* = 8,1$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 3).....	70
TABELA 3.4	Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: $T_f = 20$ min.; $P_{sat} = 450$ kPa; $TAS = 21$ m/h; $DCF = 70$ mg/L; $G_f = 80$ $\text{s}^{-1}$ , $S^* = 8,1$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 3).....	77
TABELA 3.5	Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: $T_f = 20$ min.; $P_{sat} = 450$ kPa; $TAS = 21$ m/h; $DCF = 70$ mg/L; $G_f = 100$ $\text{s}^{-1}$ , $S^* = 8,1$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 3) .....	84
TABELA 3.6	Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: $T_f = 20$ min.; $P_{sat} = 450$ kPa; $TAS = 42$ m/h; $DCF = 50$ mg/L; $G_f = 80$ $\text{s}^{-1}$ , $S^* = 8,1$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 3) .....	.92
TABELA 3.7	Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: $T_f = 20$ min.; $P_{sat} = 450$ kPa; $TAS = 42$ m/h; $DCF = 50$ mg/L; $G_f = 100$ $\text{s}^{-1}$ , $S^* = 8,1$ g de ar/m <sup>3</sup> de	

efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 3) .....	99	
<b>TABELA 3.8</b>	Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; G <sub>f</sub> = 80 s <sup>-1</sup> , S* = 8,1g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 3).....	106
<b>TABELA 3.9</b>	Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; G <sub>f</sub> = 100 s <sup>-1</sup> , S* = 8,1g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 3).....	113
<b>TABELA 3.10</b>	Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: Ausência de cloreto férrico; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; S* = 8,1g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente (ensaio 3).....	120
<b>TABELA 3.11</b>	Eficiências médias de remoção de DQO, turbidez, SST, e fósforo referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: P <sub>sat</sub> = 450 kPa . Tf = 20 min. nos ensaios com adição de cloreto férrico.....	124

## Lista de GRÁFICOS

GRÁFICO 5.1	Concentrações de DQO bruta (amostra não filtrada) observadas durante caracterização fisico-química simplificada do esgoto bruto e do efluente do Ralex.....	41
GRÁFICO 5.2	Concentrações de fosfato total observado durante caracterização fisico-química do esgoto bruto e do efluente do reator Ralex.....	42
GRÁFICO 5.3	Quantidade de ar na câmara de saturação ( $S_p$ ) em função da taxa de aplicação superficial (m/h) para pressão de saturação $P_{sat}$ .....	45
GRÁFICO 5.4	Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20$ min.; $P_{sat} = 450$ kPa; $TAS = 21$ m/h; $DCF = 50$ mg/L; $G_f = 60 s^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6$ e $16,7$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	52
GRÁFICO 5.5 -	Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20$ min.; $P_{sat} = 450$ kPa; $TAS = 21$ m/h; $DCF = 50$ mg/L; $G_f = 60 s^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6$ e $16,7$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	52
GRÁFICO 5.6 -	SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20$ min.; $P_{sat} = 450$ kPa; $TAS = 21$ m/h; $DCF = 50$ mg/L; $G_f = 60 s^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6$ e $16,7$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	53
GRÁFICO 5.7	Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20$ min.; $P_{sat} = 450$ kPa; $TAS = 21$ m/h; $DCF = 50$ mg/L; $G_f = 60 s^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6$ e $16,7$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	53
GRÁFICO 5.8	Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20$ min.; $P_{sat} = 450$ kPa; $TAS = 21$ m/h; $DCF = 50$ mg/L; $G_f = 60 s^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6$ e $16,7$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	54
GRÁFICO 5.9	Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20$ min.; $P_{sat} = 450$ kPa; $TAS = 21$ m/h; $DCF = 50$ mg/L; $G_f = 60 s^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6$ e $16,7$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	54

GRÁFICO 5.10	Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 60 $s^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	55
GRÁFICO 5.11	Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 60 $s^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	55
GRÁFICO 5.12	Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 $s^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	59
GRÁFICO 5.13	Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 $s^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	.59
GRÁFICO 5.14	SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 $s^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	.60
GRÁFICO 5.15	Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 $s^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	.60
GRÁFICO 5.16	Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 $s^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	.61
GRÁFICO 5.17	Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 $s^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	.61
GRÁFICO 5.18	Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT; Tf =	

20 min.; $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 $s^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	62	
<b>GRÁFICO 5.19</b>	Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 $s^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	62
<b>GRÁFICO 5.20</b>	Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 $s^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	66
<b>GRÁFICO 5.21</b>	Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 $s^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	66
<b>GRÁFICO 5.22</b>	SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 $s^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	67
<b>GRÁFICO 5.23</b>	Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 $s^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	67
<b>GRÁFICO 5.24</b>	Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 $s^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	68
<b>GRÁFICO 5.25</b>	Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 $s^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	68
<b>GRÁFICO 5.26</b>	Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 $s^{-1}$ ; S* = S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	69

<b>GRÁFICO 5.27 -</b>	Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	69
<b>GRÁFICO 5.28</b>	Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	73
<b>GRÁFICO 5.29</b>	Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	73
<b>GRÁFICO 5.30</b>	SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	74
<b>GRÁFICO 5.31</b>	Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	74
<b>GRÁFICO 5.32</b>	Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	75
<b>GRÁFICO 5.33</b>	Remoção de DQO no reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	75
<b>GRÁFICO 5.34</b>	Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	76
<b>GRÁFICO 5.35</b>	Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.;	

$P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	76	
<b>GRÁFICO 5.36</b>	Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	80
<b>GRÁFICO 5.37</b>	Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	80
<b>GRÁFICO 5.38</b>	SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente .....	81
<b>GRÁFICO 5.39</b>	Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	81
<b>GRÁFICO 5.40</b>	Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	82
<b>GRÁFICO 5.41</b>	Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	82
<b>GRÁFICO 5.42</b>	Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	83
<b>GRÁFICO 5.43</b>	Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	83

<b>GRÁFICO 5.44</b>	Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20\text{ min.}$ ; $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ; $TAS = 42\text{ m/h}$ ; $DCF = 50\text{ mg/L}$ ; $Gf = 80\text{ s}^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6\text{ e }16,7\text{ g de ar/m}^3$ de efluente.....	88
<b>GRÁFICO 5.45</b>	Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20\text{ min.}$ ; $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ; $TAS = 42\text{ m/h}$ ; $DCF = 50\text{ mg/L}$ ; $Gf = 80\text{ s}^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6\text{ e }16,7\text{ g de ar/m}^3$ de efluente.....	88
<b>GRÁFICO 5.46</b>	SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20\text{ min.}$ ; $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ; $TAS = 42\text{ m/h}$ ; $DCF = 50\text{ mg/L}$ ; $Gf = 0\text{ s}^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6\text{ e }16,7\text{ g de ar/m}^3$ de efluente.....	89
<b>GRÁFICO 5.47</b>	Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20\text{ min.}$ ; $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ; $TAS = 42\text{ m/h}$ ; $DCF = 50\text{ mg/L}$ ; $Gf = 80\text{ s}^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6\text{ e }16,7\text{ g de ar/m}^3$ de efluente.....	89
<b>GRÁFICO 5.48</b>	Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20\text{ min.}$ ; $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ; $TAS = 42\text{ m/h}$ ; $DCF = 50\text{ mg/L}$ ; $Gf = 80\text{ s}^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6\text{ e }16,7\text{ g de ar/m}^3$ de efluente.....	90
<b>GRÁFICO 5.49</b>	Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20\text{ min.}$ ; $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ; $TAS = 42\text{ m/h}$ ; $DCF = 50\text{ mg/L}$ ; $Gf = 80\text{ s}^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6\text{ e }16,7\text{ g de ar/m}^3$ de efluente.....	90
<b>GRÁFICO 5.50</b>	Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20\text{ min.}$ ; $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ; $TAS = 42\text{ m/h}$ ; $DCF = 50\text{ mg/L}$ ; $Gf = 80\text{ s}^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6\text{ e }16,7\text{ g de ar/m}^3$ de efluente.....	91
<b>GRÁFICO 5.51</b>	Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex. Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20\text{ min.}$ ; $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ; $TAS = 42\text{ m/h}$ ; $DCF = 50\text{ mg/L}$ ; $Gf = 80\text{ s}^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6\text{ e }16,7\text{ g de ar/m}^3$ de efluente.....	91
<b>GRÁFICO 5.52</b>	Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20\text{ min.}$ ;	

	$P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 $\text{s}^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	95
GRÁFICO 5.53	Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 $\text{s}^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	95
GRÁFICO 5.54	SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 $\text{s}^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	96
GRÁFICO 5.55	Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 $\text{s}^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	96
GRÁFICO 5.56	Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 $\text{s}^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	97
GRÁFICO 5.57	Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 $\text{s}^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	97
GRÁFICO 5.58	Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 $\text{s}^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	98
GRÁFICO 5.59	Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 $\text{s}^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	98
GRÁFICO 5.60	Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 $\text{s}^{-1}$ ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	102

GRÁFICO 5.61	Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	102
GRÁFICO 5.62	SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de fluente.....	103
GRÁFICO 5.63	Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	103
GRÁFICO 5.64	Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	104
GRÁFICO 5.65	Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	104
GRÁFICO 5.66	Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	105
GRÁFICO 5.68	Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	105
GRÁFICO 5.68	Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	109
GRÁFICO 5.69	Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P <sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s <sup>-1</sup> ; S* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	109

GRÁFICO 5.70	SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20\text{ min.}$ ; $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ; $TAS = 42\text{ m/h}$ ; $DCF = 70\text{ mg/L}$ ; $Gf = 100\text{ s}^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6\text{ e }16,7\text{ g de ar/m}^3$ de efluente.....	110
GRÁFICO 5.71	Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20\text{ min.}$ ; $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ; $TAS = 42\text{ m/h}$ ; $DCF = 70\text{ mg/L}$ ; $Gf = 100\text{ s}^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6\text{ e }16,7\text{ g de ar/m}^3$ de efluente.....	110
GRÁFICO 5.72	Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20\text{ min.}$ ; $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ; $TAS = 42\text{ m/h}$ ; $DCF = 70\text{ mg/L}$ ; $Gf = 100\text{ s}^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6\text{ e }16,7\text{ g de ar/m}^3$ de efluente.....	111
GRÁFICO 5.73	Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20\text{ min.}$ ; $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ; $TAS = 42\text{ m/h}$ ; $DCF = 70\text{ mg/L}$ ; $Gf = 100\text{ s}^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6\text{ e }16,7\text{ g de ar/m}^3$ de efluente.....	111
GRÁFICO 5.74	Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20\text{ min.}$ ; $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ; $TAS = 42\text{ m/h}$ ; $DCF = 70\text{ mg/L}$ ; $Gf = 100\text{ s}^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6\text{ e }16,7\text{ g de ar/m}^3$ de efluente.....	112
GRÁFICO 5.75	Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex. Condições de ensaio na FADAT: $T_f = 20\text{ min.}$ ; $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ; $TAS = 42\text{ m/h}$ ; $DCF = 70\text{ mg/L}$ ; $Gf = 100\text{ s}^{-1}$ ; $S^* = 8,1; 12,6\text{ e }16,7\text{ g de ar/m}^3$ de efluente.....	112
GRÁFICO 5.76	Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Ausência de Cloreto Férrico, $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ; $TAS = 21\text{ m/h}$ ; $S^* = 8,1; 12,6\text{ e }16,7\text{ g de ar/m}^3$ de efluente.....	116
GRÁFICO 5.77	Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Ausência de Cloreto Férrico, $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ; $TAS = 21\text{ m/h}$ ; $S^* = 8,1; 12,6\text{ e }16,7\text{ g de ar/m}^3$ de efluente.....	116
GRÁFICO 5.78	SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Ausência de Cloreto	

Férrico, $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; $S^* = 8,1; 12,6$ e $16,7$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	117
<b>GRÁFICO 5.79</b>	
Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Ausência de Cloreto Férrico, $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; $S^* = 8,1; 12,6$ e $16,7$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	117
<b>GRÁFICO 5.80</b>	
Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Ausência de Cloreto Férrico, $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; $S^* = 8,1; 12,6$ e $16,7$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	118
<b>GRÁFICO 5.81</b>	
Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Ausência de Cloreto Férrico, $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; $S^* = 8,1; 12,6$ e $16,7$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	118
<b>GRÁFICO 5.82</b>	
Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Ausência de Cloreto Férrico, $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; $S^* = 8,1; 12,6$ e $16,7$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	119
<b>GRÁFICO 5.83</b>	
Remoção de fósforo na unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Ausência de Cloreto Férrico, $P_{sat} = 450$ kPa; TAS = 21 m/h; $S^* = 8,1; 12,6$ e $16,7$ g de ar/m <sup>3</sup> de efluente.....	119

## Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

FAD	Flotação por ar dissolvido
FADAT	Flotação por ar dissolvido de alta taxa
Ralex	Reator anaeróbio de leito expandido
TDH	Tempo de detenção hidráulico
TAS	Taxa de aplicação superficial (m/h)
DCF	Dosagem de cloreto férrico
pH	Potencial hidrogeniônico
SST	Sólidos suspensos totais
DQO	Demanda química de oxigênio
$Q_{\text{afluente}}$	Vazão afluente à unidade de flocação ( $\text{m}^3/\text{h}$ );
$V_{\text{ol}}$	Volume total dos floculadores utilizados ( $\text{m}^3$ );
Tf	Tempo de flocação (min.)
Gf	gradiente médio de velocidade flocação ( $\text{s}^{-1}$ ),
$Q_{\text{flot}}$	Vazão afluente à unidade de flotação ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).
$A_{\text{placas}}$	Área entre placas ( $\text{m}^2$ ).
$Q_{\text{flot}}$	Vazão afluente à unidade de flotação ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).
$Q_R$	Vazão de recirculação ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).
$Q_{\text{descarte}}$	Vazão de descarte efluente à unidade de flocação ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).
Sp	Quantidade de ar na câmara de saturação, saturação em peso ( $\text{mg}/\text{L}$ )
$S^*$	Quantidade de ar fornecida ao processo de flotação( $\text{mg}/\text{L}$ )
$P_{\text{sat}}$	Pressão de saturação (kPa)
EB	Esgoto Bruto
Efl Ralex	Efluente do reator Ralex
Efl. FADAT	Efluente da unidade piloto FADAT
Re	Número de Reynolds
Rh	Raio hidráulico
Va :	Volume total de água extraído da seringa (mL).
Vy	Volume total de ar precipitado (mL).
Vxo	Nível d'água na bureta de 100 mL.

## Resumo

CARVALHO, M. E. (2003). Flotação de alta taxa aplicada ao pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. São Carlos, 2003. 131p Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

No presente trabalho foi utilizado um sistema de tratamento seqüencial de esgoto sanitário constituído de um reator anaeróbio de leito expandido (Ralex), com vazão de 10m<sup>3</sup>/h, seguido de unidade piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa (FADAT) contendo placas paralelas em seu interior, com vazão de 5,58 m<sup>3</sup>/h. Para tempo de floculação de 20min, foram estudados, como coagulantes, dosagens de cloreto férrico de 50 mg/L e 70 mg/L, taxas de aplicação superficial de 21m/h e 42 m/h, gradiente médio de velocidade de floculação de 60 s<sup>-1</sup>, 80 s<sup>-1</sup> e 100 s<sup>-1</sup> e frações de recirculação de 8%, 13% e 18%. Dentre o conjunto de condições operacionais da unidade piloto FADAT estudada, foi considerado o mais vantajoso: taxa de aplicação superficial no flotador de 21m/h, dosagem de cloreto férrico de 70 mg/L, gradiente médio de velocidade de floculação de 80 s<sup>-1</sup> e 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente. Nessas condições foram obtidas as seguintes remoções: 84% de turbidez (residual entre 6,3 e 62 uT), 73% de DQO (residual entre 20 e 156 mgO<sub>2</sub>/L), 75% de fósforo (residual entre 0,5 e 1,9 mgP/L) e 67% de SST (residual entre 8 e 80 mg/L de SST). Os resultados demonstraram que o emprego da unidade FADAT como pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio proporciona economia de energia, tendo em vista requererem de 75 a 50% da quantidade de ar exigida pelos sistemas de flotação convencional

Palavras-chave: Flotação de Alta Taxa, pós-tratamento de reator anaeróbio, remoção de fósforo por flotação, tratamento de esgoto.

## Abstract

CARVALHO, M. E. (2003). High rate dissolved air flotation applying in the pos-treatment of anaerobics reactors efluents. São Carlos, 2003. 131p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

In this work a sewage sequential treatment consisting of an expanded bed anaerobic reactor (EBAR) with  $10\text{m}^3/\text{h}$  flow was used, followed by a high rate DAF containing parallel plates in its interior, with  $58 \text{ m}^3/\text{h}$ . For a flocculation time of 20 minutes, were studied chemical additives, ferric chloride dosages of 50 mg/L and 70 mg/L, overflow rates of 21m/h and 42 m/h, velocity gradients of  $60 \text{ s}^{-1}$ ,  $80 \text{ s}^{-1}$  e  $100 \text{ s}^{-1}$  and recirculation rate between 8%, 13% and 18%. Among the group of operational conditions of the pilot unit studied high rate DAF the most advantageous was considered: overflow rates of 21m/h in the high rate DAF of 21m/h, ferric chloride dosages of 70 mg/L, velocity gradients of  $60 \text{ s}^{-1}$ , and air requirements of 8,1 g of air/ $\text{m}^3$  of wastewater. In those conditions they were obtained the following removals: 84% of turbidity (residual between 6,3 and 62 UT), 73% of DQO (residual between 20 and 156 mgO<sub>2</sub>/L), 75% of phosphorus (residual between 0,5 and 1,9 mgP/L) and 67% of SST (residual between 8 and 80 mg/L of SST). The results demonstrated that the employment of the unit high rate DAF as post-treatment of the anaerobic effluents provides economy of energy, tends in view they request of 75 to 50% of the amount of air demanded by the systems of conventional flotation.

**Keywords:** High Rate DAF; pos- treatment of anaerobic reactor, phosphorus removal by flotation; sewage treatment.

## 1 Introdução

O conceito de que os processos físico-químicos não teriam condições de oferecer resultados e custos compatíveis aos processos biológicos era o principal argumento apresentado por projetistas e estudiosos na escolha de um determinado processo para o projeto de unidades de tratamento de águas residuárias. A partir de casos estudados que apresentaram excelentes resultados com o emprego de cloreto férreo, cal, polieletrolitos e outros coagulantes como complemento aos processos biológicos, foi despertado o interesse por parte de alguns estudiosos em relação aos processos físico-químicos. Diversas aplicações desses produtos já foram efetuadas ora diretamente nos processos biológicos ora em pré ou pós-tratamento de esgotos sanitários (CAMPOS et al, 1996).

De acordo com alguns pesquisadores, dentre os processos biológicos largamente empregados no tratamento de águas residuárias, destaca-se o processo aeróbio que, comparativamente ao processo anaeróbio, apresenta melhores resultados, quando analisados isoladamente. Ocorre que, em função de suas vantagens (baixo custo de construção, operação e manutenção das instalações, baixa produção de lodo e possibilidade de aproveitamento do gás metano) em relação ao processo aeróbio, o processo anaeróbio vem sendo cada vez mais empregado. E devido à sua própria natureza, há necessidade de um tratamento complementar de seus efluentes, efetuado quase sempre em reatores aeróbios. Ainda assim, apesar do efluente dos reatores anaeróbios necessitarem de pós-tratamento, a combinação anaeróbio-aeróbio ou anaeróbio-físico-químico ainda resulta em concepções mais vantajosas do que aquelas que se fundamentam essencialmente no processo aeróbio.

O Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (SHS-EESC-USP) estabeleceu uma linha de pesquisa baseada no estudo da viabilidade do uso de processo físico-químico, flotação por ar dissolvido (FAD), como pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios ao invés do uso de processo aeróbio para este mesmo objetivo. Dentre alguns trabalhos pode-se citar CAMPOS et al. (1996), PENETRA (1998), REALI et al. (1998), REALI et al. (2000 a), REALI et al. (2000 b) e CARVALHO (2000).

O emprego da flotação por ar dissolvido (FAD), em substituição aos decantadores, para o pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios tem-se revelado alternativa bastante promissora. Por se tratar de processo de alta taxa, a FAD é particularmente eficiente na remoção de partículas suspensas e de flocos gerados pela coagulação química de esgotos sanitários. Além disso, os flotadores produzem lodos já espessados e, provavelmente promovem o arraste de gases e compostos voláteis presentes nos efluentes anaeróbios.

Os avanços e melhorias na concepção de unidades de flotação e o desenvolvimento de coagulantes altamente eficientes têm aumentado o alcance da aplicação do processo de flotação. Nessa mesma linha de pesquisa, REALI em 1993, propôs a utilização de unidades de flotação de alta taxa (FADAT), com placas especiais em seu interior, para o tratamento de águas de abastecimento, obtendo excelentes resultados. Dentre alguns trabalhos pode-se citar DOMBROSKI (1996); MARCHETO (1996); REALI & SANTOS (1996); REALI & MARCHETO (1996); MARCHETO & REALI (1997); REALI & MARCHETO (2000) e PATRIZZI (2002).

A flotação por ar dissolvido de alta taxa (FADAT), no tratamento de água de abastecimento, apresenta alguns aspectos positivos em relação a flotação por ar dissolvido (FAD). Ocorre que, operando em altas taxas, a FADAT permite redução maior que 50% no tamanho da unidade de flotação, possibilitando com isso a diminuição dos custos de montagens da estação. Outra grande vantagem é a economia de energia, uma vez que esse tipo de reator requer menores quantidades de ar dissolvido para a flotação, que a flotação convencional.

O lodo gerado no sistema de flotação poderá receber adição de cal ( $\text{pH}>12$ ) para efetuar sua desinfecção e em seguida ser utilizado na agricultura, uma vez que o cloreto férrico utilizado no processo de tratamento, ao contrário do sulfato de alumínio, até o que se conhece no presente momento, não coloca em risco a saúde humana e é menos agressivo ao solo e às culturas em geral.

## 2 Objetivos

Os objetivos do presente trabalho foram:

- i) Avaliação do desempenho, quanto à remoção de turbidez, SST, DQO e fósforo, de um sistema piloto (protótipo) de tratamento seqüencial de esgoto sanitário, constituído de reator anaeróbio seguido de unidade de flotação de alta taxa contendo placas paralelas, entre as quais se tem escoamento vertical associado a baixos números de Reynolds (Re).
- ii) Obtenção dos valores mais adequados para os seguintes parâmetros de projeto do sistema de flotação de alta taxa como pós-tratamento do efluente de reator anaeróbio: taxa aparente de aplicação superficial, quantidade de ar requerida para a adequada flotação e gradiente médio de velocidade de flocação antecedendo a flotação.

### 3 Revisão da Literatura

#### 3.1 Flotação por Ar Dissolvido (FAD)

Atualmente, a FAD é uma técnica de separação de fases conhecida e utilizada no campo de saneamento ambiental, abrangendo vários tipos de aplicação. É utilizada em sistemas de tratamento de águas residuárias oriundas de indústrias de papel e celulose, petrolífera, de tintas, de óleos vegetais e alimentícias em geral e têm merecido atenção em função da eficiência apresentada na remoção dos agentes indesejáveis presentes nestes efluentes. A FAD tem sido empregada com bastante sucesso na clarificação de águas de abastecimento, em substituição aos decantadores (REALI, 1991).

De acordo com o autor, a FAD tornou-se uma alternativa promissora, pois inversamente à sedimentação, é um processo que promove a ascensão das partículas no interior do reator, através da aderência das microbolhas de gás às partículas previamente floculadas, o que as torna menos densas que a água (flutuáveis), proporcionando sua rápida remoção na parte superior da unidade de flotação.

Segundo REALI (1991) a FAD apresenta algumas vantagens sobre a sedimentação:

- ✓ Possibilidade de arraste de parcela de substâncias voláteis porventura presentes na água;
- ✓ Possibilidade de oxidação de íons metálicos dissolvidos na água, como o ferro, por exemplo;
- ✓ Produção de lodo com elevado teor de sólidos na superfície do flotador podendo atingir até 12% (em peso), dependendo do tipo de dispositivo de coleta utilizado e das características da dispersão;
- ✓ Constitui processo de alta taxa, resultando em unidades compactas e versáteis, que possibilitam bom nível de controle operacional através do monitoramento da quantidade de ar fornecida ao processo.

Em vista das vantagens mencionadas, a FAD tem sido objeto de estudos de diversos pesquisadores da área de saneamento, visando determinar e otimizar os parâmetros influentes no processo e descobrir novas aplicações nesta área. Pode-se

citar BRATBY (1982), BERNARD et al. (1995), EDZWALD (1992), CAMPOS et al. (1996), PENETRA et al. (1999), REALI et al. (2000 a), REALI et al. (2000 b) , CARVALHO (2000). PENETRA et al. (2002) e ALÉM SOBRINHO, P. et al. (2002).

### **3.2 Aplicação da FAD no Tratamento de Águas Residuárias como Pós-tratamento de Reatores Anaeróbios e de Sistemas Seqüenciais de Tratamento (anaeróbios/aeróbio)**

Segundo PENETRA *et al.* (1999), até o final do século passado, quase todas as estações de tratamento de águas residuárias eram projetadas com um reator aeróbio sendo a principal unidade para a remoção da matéria orgânica. Os processos físico-químicos só eram escolhidos em condições excepcionalmente favoráveis a sua aplicação, e reatores anaeróbios eram utilizados principalmente na digestão de lodos.

Mudanças significativas na concepção dos sistemas de tratamento de águas residuárias foram introduzidas através do uso de reator anaeróbio como unidade principal na remoção de matéria orgânica. Vários fatores influenciaram essa tendência, como por exemplo: a compreensão de que reatores anaeróbios podem ser efetivamente utilizados para a remoção da matéria orgânica dissolvida, a crise energética levando à procura de sistemas com baixo consumo de energia e as altas quantidades de lodos produzidas nos processos aeróbios. Entretanto, com essa concepção, eram atingidas eficiências de remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO) na faixa de apenas 70 a 75%, no tratamento de esgotos domésticos. Sendo assim, a adoção de unidades de pós-tratamento, como lagoas de estabilização, filtros aeróbios, lodos ativados e reatores seqüenciais em batelada eram freqüentemente necessárias para atingir os padrões de emissão.

Resultados de estudos recentes, utilizando processos físico-químicos para o tratamento de esgotos domésticos indicaram que a flotação por ar dissolvido (FAD) pode ser uma alternativa bastante atraente para o pós-tratamento de reatores anaeróbios.

PENETRA et al. (1999), empregando a FAD como pós-tratamento para o efluente do reator UASB, utilizando 65 mg/l de cloreto férrico, 15 min. e 80 s<sup>-1</sup> de tempo (Tf) e gradiente médio de velocidade de flocação (Gf), respectivamente, e 19 g ar/m<sup>3</sup> de afluente, obteve 88% de remoção de DQO, 96% de fosfato total, 94% de sólidos suspensos totais (SST) e 97% de turbidez.

REALI et al. (1998), estudando a eficiência da flocação na flotação de efluentes de reatores anaeróbios (UASB), obtiveram remoção de 91% de DQO, 96% de fosfato total, 98% de turbidez e 98% de SST, com dosagem de cloreto férrico de 65 mg/l, Gf em torno de 80 s<sup>-1</sup> e Tf entre 15 e 25 min.

O autor do presente trabalho, estudando o pós-tratamento físico-químico por flotação de efluentes de reator anaeróbio de leito expandido (Ralex), utilizando 30mg/l de cloreto férrico, 1,0 mg/l de polímero catiônico G9047, Gmf 800 s<sup>-1</sup>, Tmr 30 s, Tf 20 min., Gf 60 s<sup>-1</sup> e fração de recirculação (R) 20%, obteve eficiência de remoção de turbidez de 97% , de DQO de 72% e de fósforo de 93%. Baseado nesses resultados o autor da pesquisa pode constatar que a aplicação de cloreto férrico associado a polímero catiônico como auxiliantes de flocação no pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, conforme sugeriu PENETRA (1998) permitiu dosagens significativamente menores quando comparadas à aplicação em separado desses coagulantes.

ALÉM SOBRINHO et al. (2002), avaliaram o desempenho do sistema Ralf (Uasb) e coagulação-flotação, construído em escala real, para o tratamento de esgoto sanitário. Os estudos relativos ao monitoramento da ETE Cambuí (Campo Largo – PR), instalação para uma vazão de 360 m<sup>3</sup>/h construída pela Sanepar, que emprega sistema Ralf + FAD, apresentaram eficiências de remoção no flotador de 97% de DQO, de 88% de SST e de 64% de PO<sub>4</sub>. A turbidez igualmente apresentou elevada eficiência de remoção e o efluente do flotador 4,1 ± 2,7 UNT. Os estudos relativos ao monitoramento de uma instalação piloto operando com efluente anaeróbio, construída junto a ETE Ronda (Ponta Grossa - PR), apresentaram os seguintes valores para o efluente do flotador: 37 ± 17 mg/l de DQO, 4,4 mg/l de turbidez e 0,07 ± 0,06 mg/l de fosfato.

### **3.3 Unidades Modernas de Flotação por Ar Dissolvido (Unidades de Terceira Geração)**

Recentes melhorias nas unidades de flotação e o estudo da aplicação de diferentes tipos de coagulantes como o sulfato ferroso, cloreto férrico e polieletrólitos, têm aumentado o alcance do emprego do processo de flotação.

A partir da experiência obtida com a operação de diversos tipos de unidades de floto-filtração desenvolvidos nas duas últimas décadas, surgiu recentemente uma nova geração de unidades de flotação por ar dissolvido (FAD), capazes de operar com elevadas taxas de aplicação superficial mantendo bom desempenho. Nas unidades de floto-filtração, os processos de flotação e filtração da água ocorrem na mesma região, ou seja, essa unidade conjuga os dois processos em uma mesma área física. Desta forma, o filtro situado logo abaixo da região de flotação proporciona uma distribuição bastante uniforme do escoamento em toda a área de pré-separação dos sólidos por flotação. Isso permite a operação dessas unidades com elevados valores de taxa de aplicação superficial (TAS), em regime de escoamento turbulento (KIURU, 2000).

A esse respeito, KIURU comenta que no passado se acreditava que a flotação podia operar com eficiência somente nos casos de regime de escoamento laminar no interior das unidades de flotação convencionais. Sabe-se que, quando a taxa de aplicação superficial de água excede um determinado valor, a condição de escoamento inevitavelmente mudará de laminar para turbulento. No caso das novas unidades de flotação de alta taxa, a tarefa é como controlar a condição de escoamento turbulento da água, de forma que o fenômeno da flotação aconteça eficientemente em tal situação.

KIURU ainda relata que existem diferentes soluções para tentar resolver essa questão, dentre as quais está o trabalho desenvolvido por OIVA SUUTARINEM DE RICTOR LTD, utilizando unidades em escala piloto e em escala real.

Na unidade FAD de alta taxa estudada por SUUTARINEM existe um fundo falso formado por uma placa horizontal e perfurada, delimitando uma região de cerca de 0,5m entre a zona de flotação e fundo da unidade. Vários orifícios de diversos tamanhos foram distribuídos em toda a superfície dessa placa com a finalidade de controlar o fluxo de água na região de flotação e distribuí-lo de maneira uniforme,

apesar das condições turbulentas de fluxo. Conforme observado pelo pesquisador, a superfície calma e horizontal ocupada pelas micro-bolhas indicou que as condições hidráulicas da flotação em regime turbulento foram controladas corretamente, pois a água clarificada abaixo da área das micro-bolhas indicou uma eficiente remoção de sólidos. Desse modo o autor concluiu que a FAD pode ser operada também em condições de fluxo turbulento, mantendo bom desempenho.

LUDGREN (1970) relata que um dos maiores avanços na tecnologia da flotação constitui na introdução de placas finas dentro da unidade de flotação. O autor cita Reynolds, que em seu trabalho sobre o comportamento dos fluxos em canais, estudou os parâmetros de variabilidade que caracterizam os escoamentos laminar e turbulento. O agrupamento dessas variáveis resulta no chamado número de Reynolds, e pode ser definido para canais abertos como o adimensional expresso pela seguinte fórmula:

$$Re = \frac{4.Rh.G}{\mu} \quad (3.1)$$

Em que:  $Rh$  : Raio hidráulico ( ft ),  $G$  = Velocidade do fluxo ( lb / ft<sup>2</sup>.sec ) e  $\mu$  : Viscosidade do líquido( lb / ft.sec ).

A análise da fórmula mostra de que forma acontece a melhora no desempenho da unidade de flotação com a introdução das placas.

Ainda, segundo LUDGREN (1970), primeiramente se admite que o número de Reynolds deve ser uma constante. Para assegurar um escoamento laminar em uma situação particular qualquer, também se assume que a viscosidade permanece constante através do sistema. Baseado nessa concepção, as únicas variáveis são o raio hidráulico e a velocidade. Sendo o produto dessas variáveis uma constante, para manter o número de Reynolds e consequentemente o escoamento laminar, a velocidade do fluxo deve aumentar, o que significa elevar a taxa de aplicação superficial. Com a divisão da zona de flotação em vários canais estreitos, é possível aumentar a taxa de aplicação superficial sem provocar escoamentos turbulentos.

O pesquisador relata que, na década de 60, a eficiência da utilização de placas com o objetivo de melhorar o desempenho das unidades de flotação foi comprovada na Europa, Ásia e América do Sul. Resultados de pesquisas realizadas indicam que o uso de placas no interior de unidades convencionais de flotação proporcionou um

aumento significativo na taxa de aplicação superficial e que a operação dessas unidades com taxas elevadas permitiu a redução do tamanho das mesmas, oferecendo as seguintes vantagens:

- ✓ Redução de 40 a 50% do espaço físico para a instalação, essa redução possibilita uma maior flexibilidade na escolha da localização.
- ✓ Construção de unidades compactas e móveis que podem ser transportadas.

O emprego de unidades de flotação de alta taxa (FADAT) contendo placas paralelas em seu interior é, desde 1993, objeto de ampla linha de pesquisa implantado no Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Nessa linha, REALI (1993), propôs a utilização de unidades de flotação de alta taxa (FADAT), para o tratamento de águas de abastecimento, obtendo excelentes resultados, tanto no que se refere ao desempenho desse novo tipo de reator (bastante compacto), quanto à economia de energia, tendo em vista a menor quantidade de ar requerida pelo mesmo. Naquela época foram desenvolvidos dois tipos de flotadores de alta taxa, ambos contendo módulos com placas especiais em seu interior, sendo um deles com escoamento vertical e outro com escoamento horizontal. Ainda dentro dessa linha de pesquisa pode-se citar vários trabalhos relacionados à aplicação da FADAT no tratamento de águas de abastecimento. (DOMBROSKI, 1996; MARCHETO, 1996; REALI & SANTOS, 1996; REALI & MARCHETO, 1996; MARCHETO & REALI, 1997; REALI & MARCHETO, 2000 e PATRIZZI, 2002).

Merece destaque a pesquisa desenvolvida por REALI & SANTOS (1996), onde foi avaliado o desempenho da citada unidade de alta taxa, FADAT, com escoamento vertical entre as placas, aplicada ao tratamento de água para abastecimento contendo elevada concentração de algas em suspensão. Os autores concluíram que o tipo de unidade estudada apresentou desempenho muito bom para remoção de algas (remoções de: 96,1% de clorofila a, 90,5% de turbidez e 90,7% de SST, com quantidade de ar igual a 4,7 g ar/m<sup>3</sup> afluente, velocidade entre as placas igual a 100,3 cm/min., número de Reynolds a 1020 e taxa de aplicação superficial igual 1095 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia). A unidade de flotação estudada demonstrou constituir alternativa bastante eficiente para tratamento de água bruta contendo elevada

biomassa de algas em suspensão, podendo operar com altas taxas e exigindo menores quantidades de ar que aquelas usualmente requeridas em unidades convencionais de flotação.

Vale salientar a pesquisa realizada por REALI & MARCHETO (1996) na qual foi desenvolvido outro tipo de unidade de flotação de alta taxa (FADAT), em que o escoamento da água entre as placas ocorre no plano horizontal, ao contrário daquela citada no parágrafo anterior, onde o escoamento é vertical. Esse novo tipo de flotador foi aplicado ao tratamento de água para abastecimento contendo cor moderadamente elevada e baixa turbidez. Os autores concluíram que, de maneira geral, a unidade de flotação proposta, contendo placas paralelas dispostas em um ângulo de 60°, a exemplo da unidade FADAT com escoamento vertical, também demonstrou ser alternativa bastante atraente para o tratamento de água do tipo estudado, constituindo reator de alta taxa, que requer pouca quantidade de ar para a flotação e apresenta bom desempenho (92% de remoção de cor, 90% de turbidez e 93% de SST para taxa de aplicação superficial de 268 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> dia e quantidade de ar de 4 g ar/m<sup>3</sup> afluente e 84% de remoção de cor, 81% de turbidez e 86% de SST para taxa de aplicação superficial de 1104 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia e quantidade de ar de 6 g ar/m<sup>3</sup> afluente desde que água tenha sido coagulada/floculada adequadamente).

PATRIZZI (2002) estudou o comportamento de instalação de flotação por ar dissolvido lamelar com alta taxa e escoamento horizontal, em escala piloto, alimentada com água bruta de estudo contendo 5,0 mg/L de ácido húmico, turbidez em torno de 15 uT, cor aparente em torno de 120 uT, ferro em torno de 3,40 mg/L e manganês em torno de 0,20 mg/L. A autora concluiu que, a unidade piloto de flotação por ar dissolvido lamelar de alta taxa com escoamento horizontal apresentou elevada eficiência de clarificação da água de estudo após prévia adequação das condições de oxidação química, coagulação e floculação. Essa unidade foi capaz de operar com excelente desempenho, com taxas de até 39 m/h, desde que fosse fornecido 4,3 g de ar/ m<sup>3</sup> de água e tempo de floculação de 20 minutos. A utilização de taxa de aplicação superficial no flotador de 26 m/h, tempo de floculação de 15 minutos, gradiente médio de velocidade de floculação de 60 s<sup>-1</sup> e 8,1 g de ar m<sup>3</sup> de água proporcionaram as melhores condições de operação fornecendo: 0,79 uT de

turbidez residual, 5 uC de cor aparente, 0,52 mg/L de ferro residual e 0,10 mg/L de manganês residual.

### **3.4 Alguns Aspectos Teóricos da Coagulação/Flocação em Tratamento de Águas Residuárias**

A maior parte das impurezas presentes na água residuária é constituída por partículas sólidas, cujo tamanho pode variar de 0,005 µm a cerca de 100 µm, ou estão associadas a ela. A presença de cargas elétricas na superfície dessas partículas é essencial para a existência delas como coloides. Na superfície dessas partículas coloidais existe uma dupla camada elétrica que impede a ligação delas entre si (ODEGAARD 1979).

Segundo JOHNSON & AMIRTHARAJAH (1983), a coagulação é o processo que supera a barreira repulsiva formada pelas forças elétricas de repulsão e atração que interagem entre as partículas em solução, permitindo que ocorra a agregação. A desestabilização de coloides em águas residuárias ocorre provavelmente pela adsorção na superfície dos coloides de espécies hidrolisadas de coagulantes com cargas opostas.

De acordo com ODEGAARD (1979), os produtos químicos mais comumente utilizados visando desestabilização das partículas coloidais e a formação química dos flocos em tratamento de água residuária, são os sais de alumínio, sais de ferro e cal. Quando tais coagulantes são adicionados à água residuária ocorrem pelo menos dois processos diferentes e de interesse ao tratamento:

- ◆ Coagulação (ou desestabilização) das partículas (coloides)
- ◆ Precipitação do fosfato solúvel (ver item 3.5)

O objetivo da flocação é agregar o maior número possível de partículas primárias coaguladas/precipitadas em flocos para que eles sejam separados o mais eficientemente possível.

O processo de formação e separação dos flocos pode ser dividido em três etapas:

- 1 - Coagulação/precipitação

## 2 – Floculação

### 3 - Separação (sedimentação, flotação, filtração)

Em todas as etapas há a formação de flocos, mas a formação inicial ocorre na primeira etapa. Após a coagulação, as partículas possuem tamanhos na faixa de 0,5  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$ . Na segunda etapa (floculação), as partículas primárias agregam-se em consequência das colisões promovidas, ocorrendo a formação de flocos maiores, na faixa de 100  $\mu\text{m}$  a 5000  $\mu\text{m}$ . Na coagulação, o processo é realizado em questão de segundos e relaciona-se com a química do processo, enquanto que na floculação e separação dos flocos, etapas que demandam tempo superior a alguns minutos, prevalecem os aspectos físicos do processo. Na separação por sedimentação as partículas suspensas apresentam movimento descendente em meio líquido de menor massa específica, devido à ação da gravidade, enquanto que na separação por flotação a aderência de bolhas de ar nas partículas suspensas promove a ascensão das mesmas.

ODEGAARD (1995), utilizando dosagens de sulfato de alumínio de 300 mg/L no estudo da remoção de fosfato e de turbidez empregando a floculação/flotação no tratamento químico de esgotos sanitários brutos, obteve residuais de 0,1 mg/L de fosfato total e turbidez em torno de 1,0 uT. O autor concluiu que o emprego de tempo de floculação de 25 a 30 min e gradiente médio de velocidade na floculação ( $G_f$ ) entre 60 e 80  $\text{s}^{-1}$  era mais apropriado para a floculação seguida de flotação, para velocidades de flotação entre 8,3 e 16,7 cm/min.

REALI et al (1998), estudando a avaliação da influência do gradiente médio de velocidade ( $G_f$ ) e do tempo de floculação ( $T_f$ ) na eficiência de uma unidade de flotação (FAD) em escala de laboratório alimentada com efluente de reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) tratando esgoto sanitário, concluíram que o emprego de valores de  $G_f$  em torno de 80  $\text{s}^{-1}$  e de  $T_f$  entre 15 e 25 min, forneceram excelentes resultados no sistema de FAD, com remoção de até 91% de DQO, 96 % de fosfato total 98% de turbidez e 98% de sólidos suspensos.

PENETRA (2002) estudou a influência das condições de floculação no desempenho de sistema experimental de tratamento de esgoto sanitário constituído de reator anaeróbio de leito expandido (Ralex) seguido de unidade de flotação por ar dissolvido (FAD) utilizando 50 mg/L de cloreto férrico, 18% de vazão de

recirculação,  $450 \pm 10$  kPa de pressão de saturação, taxa de aplicação superficial de  $180 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}$ . Os melhores resultados, obtidos com  $G_f$  de  $80 \text{ s}^{-1}$  e  $T_f$  de 20 minutos, foram os seguintes: 94,4 % de remoção de DQO (com residual de 53 mg/L), 87% de remoção de fósforo (com residual de 0,8 mgP/L), 96,7% de remoção de sólidos suspensos totais (residual de 9mg/L de SST) e 96,4% de turbidez (com residual de 12,9 uT), quando o efluente do reator anaeróbio apresentou qualidade ruim durante todo o ensaio.

### 3.5 Remoção de Fósforo

ESTEVES (1988) relata que o fósforo é muito importante nos sistemas biológicos devido a sua participação em processos fundamentais do metabolismo dos seres vivos, tais como: armazenamento de energia (forma uma fração essencial da molécula de ATP) e estruturação da membrana celular (através de fosfolipídeos). O fósforo é o principal fator limitante da produtividade da maioria das águas continentais e tem sido apontado como o principal responsável pela eutrofização artificial desses ecossistemas em regiões tropicais. Toda forma de fósforo presente em águas naturais, seja na forma iônica, seja na forma complexada, encontra-se sob a forma de fosfato. Atualmente, a maioria dos pesquisadores tem empregado uma classificação sumária que agrupa as várias formas em apenas cinco:

- ◆ Fósforo particulado (P-particulado);
- ◆ Fósforo orgânico dissolvido (P-orgânico dissolvido);
- ◆ Fósforo inorgânico dissolvido ou ortofosfato ou fósforo reativo (P-orto);
- ◆ Fósforo total dissolvido (P-total dissolvido) e
- ◆ Fósforo total (P-total).

Dentre as formas de fosfato, o P-orto assume maior relevância por ser a principal forma assimilada pelos vegetais aquáticos.

O fosfato presente em ecossistemas aquáticos continentais tem origem em fontes naturais (rochas de bacias de drenagem, material particulado presente na atmosfera e fosfato resultante da decomposição de organismos de origem alóctone) e

artificiais (esgotos domésticos e industriais, fertilizantes agrícolas e material particulado de origem industrial presente na atmosfera).

A disponibilidade de nitrogênio e fósforo nas águas superficiais tende a causar crescimento excessivo da vida aquática, que utiliza esses elementos para sua síntese celular (notadamente os organismos autotróficos, como as algas). Desta forma, pode ocorrer desenvolvimento “explosivo” de biomassa (autotrófica) nas águas quando nitrogênio e fósforo estão disponíveis em abundância. Esta biomassa produz oxigênio dissolvido (OD) durante o dia pela fotossíntese, mas à noite devido à ausência de luz, haverá apenas consumo de oxigênio e a concentração de OD pode atingir níveis baixos demais para sustentar a vida de outros (macro)organismos. Essa deterioração da qualidade da água é denominada eutrofização (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994<sup>1</sup> *apud* PENETRA 1998).

De acordo com os biólogos, a definição mais completa de eutrofização seria: “Processo de enriquecimento de lagos, represas ou rios, resultante do aumento da concentração de nitrogênio e fósforo na água e consequentemente, da produção orgânica.”

Em função da forte tendência em apontar o fósforo como o principal agente causador da eutrofização dos lagos, e para atender aos padrões de emissão estabelecidos por lei, a remoção de fósforo e os processos que a envolve vêm recebendo uma atenção especial nos últimos anos.

Em muitas localidades as agências controladoras de poluição exigem remoção significativa de fósforo das águas residuárias antes do lançamento no corpo receptor final. Pesquisas relatam o crescente aumento per capita da contribuição de fósforo nos despejos e apontam como grandes responsáveis o crescimento da população e a grande variedade de produtos utilizados que possuem o fósforo como componente. (LAWRENCE *et al*, 1969).

Estudiosos estimam uma contribuição diária de 50 kg de fósforo provenientes de esgoto doméstico, o que representa cerca de 85% do total. Os detergentes sintéticos de uso doméstico possuem papel importante nessa contribuição, pois utilizam em sua fórmula, o fosfato, que possui diversas funções, como: manter a

---

<sup>1</sup> VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. (1994) *Anaerobic Sewage Treatment: A Practical Guide for Regions with a Hot Climate*. John Wiley & Sons, Chichester, England, 1994.

alcalinidade requerida para as condições ideais de limpeza, reagir com gorduras, dispersar e suspender a sujeira, promover a formação de micelas, abrandamento da água pelo seqüestro de cálcio e magnésio, e emulsificar gorduras. (WEAVER, 1969).

Existe um número de tecnologias estabelecidas ou ainda em desenvolvimento, capaz de oferecer uma remoção de fósforo dentro de estratégias sustentáveis, entre as quais pode-se citar os processos físico-químicos e a remoção biológica como as mais utilizadas.

ODEGAARD (1979) relata que uma fração substancial do fósforo presente nas águas residuárias encontra-se na forma de matéria em suspensão, que é removida por coagulação.

Segundo NESBITT (1969), os precipitantes mais comuns geralmente utilizados para a remoção de fósforo são: sulfato de alumínio, cloreto férrico, sulfato ferroso e cal. O tratamento físico-químico é amplamente apropriado para a remoção de fósforo de água residuária, atingindo remoção acima de 90%, independente do produto químico utilizado, porém a implantação de uma operação para remoção de fósforo nas estações de tratamento de esgotos já em operação poderia dobrar os custos do tratamento.

A difusão do uso da precipitação química para a remoção de fósforo dos corpos d'água se iniciou nos anos 50, na Suíça, em resposta ao avanço dos problemas causados pela eutrofização. De tecnologia simples, a precipitação química é essencialmente um processo físico-químico baseado na adição de sais metálicos divalente ou trivalente na água residuária. Os metais mais eficientes são o ferro e o alumínio, normalmente adicionados como cloretos e sulfatos. (MORSE, G.K., *et al*, 1998).

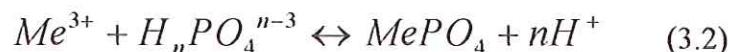
Ainda segundo o autor, o uso do cloreto férrico em vez do sulfato de alumínio deve ser valorizado, pois a presença de ferro em lodos não redunda em aspectos negativos como aqueles decorrentes da presença do  $Al_3SO_4$ , pois o alumínio é muito danoso ao solo e também pode provocar malefícios em seres vivos caso ocorra sua ingestão. Estudos indicam que a aplicação de cloreto férrico no tratamento terciário pode resultar em um efluente de alta qualidade e que a disposição na agricultura pode resolver de forma parcial o inconveniente da geração do lodo.

De acordo com AGUILAR *et al.* (2001), um dos objetivos da aplicação dos processos de coagulação e floculação é geralmente o de remover a matéria coloidal presente na água residuária, mas nutrientes também podem ser removidos durante o processo.

Segundo o autor, no processo de coagulação/floculação de águas residuárias, a remoção de fósforo pode estar relacionada com os seguintes fatores:

- ✓ Incorporação do fosfato aos sólidos em suspensão e a remoção desses sólidos com a consequente remoção de fósforo.
- ✓ Absorção de íons fosfato na hidrólise dos produtos formados pelo íon do metal utilizado como coagulante.
- ✓ Remoção através da formação de precipitados de fosfato com os sais do metal utilizado como coagulante.

“A remoção de fosfato através de precipitação química é influenciada por um número de fatores, entre os quais os mais importantes são a alcalinidade, a presença de matéria orgânica e a presença de outros metais. A reação química (eq. 3.2) apresenta de forma simplificada a precipitação do fósforo:



Geralmente o fósforo encontrado na forma de fosfato é removido pela precipitação do fosfato com o íon metálico, enquanto o fósforo total é removido por complicada combinação de interação e adsorção com as partículas floculadas” (AGUILAR, 2001)

REALI *et al.* (1998), empregando a FAD no tratamento de efluentes de reatores anaeróbios (UASB), aplicando dosagem de cloreto férrico de 65 mg/l, Gf de  $80\text{s}^{-1}$  e Tf entre 15 e 25 min., obteve remoção de fosfato total de 96%. Já PENETRA *et al.* (1999), com aplicação de 65 mg/l de cloreto férrico e 19 g ar/m<sup>3</sup> de afluente (recirculação de 20% em volume), obteve remoção de fosfato total de 95,4%. O autor da presente pesquisa, em seu trabalho de iniciação científica, onde o Reator Anaeróbio de Leito Expandido (Ralex) encontrava-se em início de operação, utilizando 40mg/l de cloreto férrico, Gmr 1000 s<sup>-1</sup>, Tmr 30 s, Tf 20 min., Gf 80 s<sup>-1</sup> e fração de recirculação (R) 20%, obteve eficiência de remoção de fósforo de 62%. PENETRA (2002) no estudo do desempenho de sistema experimental de tratamento de esgoto sanitário constituído de reator anaeróbio de leito expandido (Ralex)

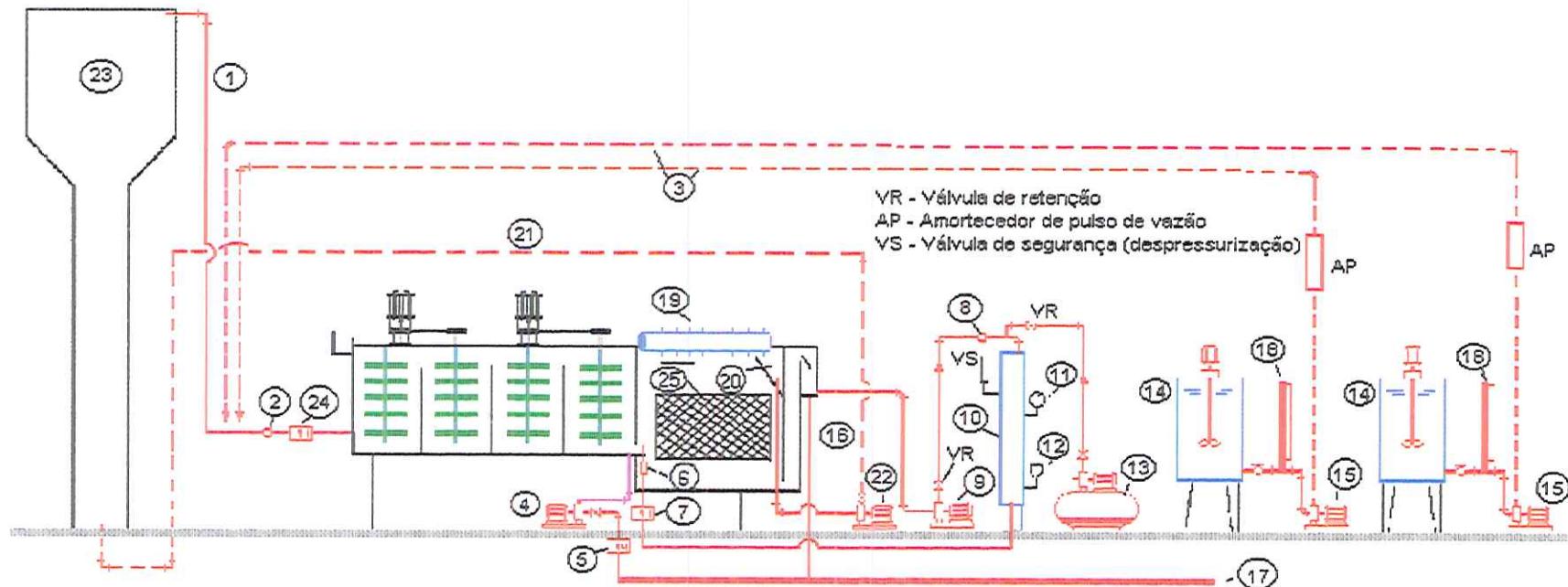
seguido de unidade de flotação por ar dissolvido (FAD) com aplicação de 50 mg/L de cloreto férrico, 18% de recirculação, taxa de aplicação superficial de 180 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia, Gf de 80 s<sup>-1</sup> e Tf de 20 minutos obteve 87% de remoção de fósforo (com residual de 0,8 mgP/L).

## 4 Materiais e Métodos

### 4.1 Considerações Iniciais

Conforme descrito no capítulo 2 a principal proposta do presente trabalho foi a investigação do desempenho de um sistema de tratamento seqüencial de esgoto sanitário, constituído de reator anaeróbio seguido de unidade de flotação de alta taxa, contendo placas paralelas entre as quais se tem escoamento vertical associado a baixos números de Reynolds (Re).

O trabalho foi desenvolvido utilizando-se instalações de pesquisa implantadas na área norte do Campus USP/São Carlos constituídas de reator anaeróbio de leito expandido (Ralex) e unidade piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa, como pode ser visto no esquema apresentado na FIGURA 1. Foram investigadas as melhores condições de coagulação e flocação no emprego de cloreto férrico como coagulante. Para um tempo de flocação de 20 minutos mantido fixo, foram estudados a dosagem de cloreto férrico (DCF), o gradiente médio de velocidade flocação (Gf), a quantidade de ar dissolvido fornecida ao processo (S\*) e a influência da Taxa de Aplicação Superficial (TAS) na eficiência da flotação de alta taxa.



- 1 - Tubulação de ligação entre o reator RALEX e a instalação piloto de FAD  
 2 - Registro para controle da vazão afluente  
 3 - Adição do coagulante junto ao misturador "in-line"  
 4 - Bomba para descarte da vazão floculada excedente  
 5 - Medidor eletrônico de vazão floculada descartada  
 6 - Registro de agulha 3/4" para controle da vazão de recirculação saturada  
 7 - Medidor eletromagnético de vazão de recirculação saturada  
 8 - Registro de agulha 1/2" para controle da vazão afluente à câmara de saturação  
 9 - Bomba de recalque da vazão afluente à câmara de saturação  
 10 - Câmara de saturação  
 11 - Manômetro  
 12 - Ventosa  
 13 - Compressor de ar  
 14 - Tanque para preparo de solução de coagulante  
 15 - Bomba dosadora de solução de coagulante  
 16 - Vazão afluente tratada  
 17 - Rede coletora de esgotos  
 18 - Medidor volumétrico de dosagem da solução de coagulante  
 19 - Sistema de remoção do lodo flotado  
 20 - Canaleta coletora de lodo flotado  
 21 - Recirculação de fração do lodo flotado para a mistura rápida ou para o RALEX  
 22 - Bomba dosadora para recirculação do lodo flotado  
 23 - Reator Anaeróbio de Leito Expandido (RALEX)  
 24 - Misturador rápido "in-line"  
 25 - Módulo de Alta Taxa contendo placas planas paralelas conforme concebido por REALI (1993).

FIGURA 1 – Esquema simplificado do sistema de tratamento seqüencial de esgoto sanitário, constituído de reator anaeróbio (Ralex) seguido de unidade de flotação de alta taxa (Adaptado de PENETRA, 2000).

## 4.2 Descrição das Instalações Utilizadas

### 4.2.1 Instalação piloto de coagulação/flocação/flotação por ar dissolvido de alta taxa, com escoamento contínuo (FADAT)

Como pós-tratamento do efluente do reator (Ralex), encontrava-se em operação uma unidade convencional de Flotação por Ar Dissolvido (FAD). Esse sistema de tratamento de esgoto, constituído pelos reatores (Ralex) seguido de (FAD) foi objeto de pesquisa de doutorado realizada pelo Eng. Rogério Gomes Penetra, também sob orientação do Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali. Tal unidade de fotação por ar dissolvido foi desmontada e transformada em unidade de flotação de terceira geração, através da instalação de módulo de alta taxa no seu interior.

A instalação piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa (FADAT) e a câmara de saturação foram construídas em aço inox e as placas constituintes do módulo de alta taxa foram confeccionadas em alumínio e revestidas de pintura epóxi.

O sistema de pós-tratamento funcionava da seguinte maneira:

O efluente anaeróbio do reator Ralex era direcionado, por gravidade, ao sistema de coagulação/flocação/flotação, composto inicialmente por medidor eletromagnético da vazão. Em seguida o líquido era encaminhado para um misturador tipo injetor, instalado na tubulação que alimentava as câmaras de flocação. A aplicação do coagulante era realizada na própria tubulação, num ponto imediatamente à montante do misturador, projetado para fornecer gradiente médio de velocidade na mistura rápida na faixa de  $3.000$  a  $9.000\text{ s}^{-1}$  aproximadamente (para vazões entre  $0,9$  e  $1,9\text{ L/s}$ ).

Após a coagulação, o líquido passava pela unidade de flocação, que era composta por quatro câmaras em série, contendo agitadores lentos mecanizados, com eixo vertical e paletas perpendiculares ao eixo (ver FIGURA 2 e FIGURA 7). Para o estudo de tempos de flocação variados, existia na entrada de cada uma das três primeiras câmaras de flocação, registros para o controle de vazão, possibilitando a utilização de duas, três ou quatro câmaras de flocação.

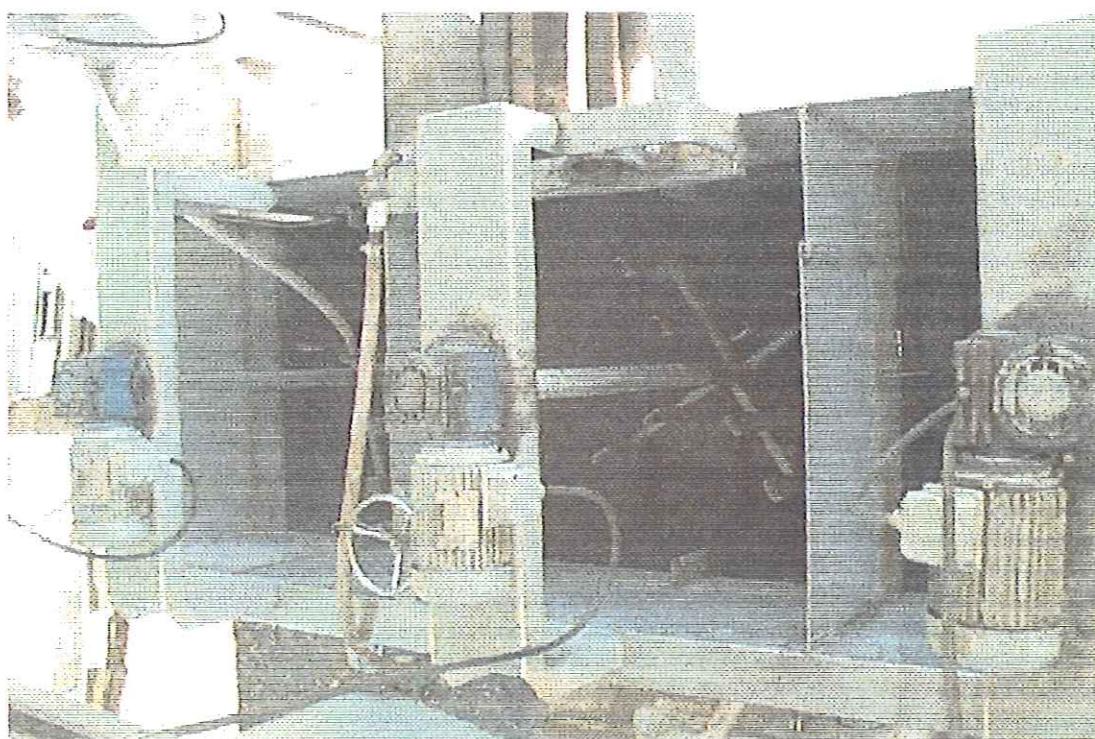


FIGURA 2 – Fotografia de parte da unidade de floculação do flotador por ar dissolvido de alta taxa.

O líquido floculado, então, era introduzido na unidade de flotação, onde era misturado à vazão de recirculação pressurizada, saturada com ar dissolvido (proveniente da câmara de saturação) (ver detalhe na FIGURA 3). Essa mistura ocorria na zona de contato, propiciando a colisão e a aderência das microbolhas de ar aos flocos. Após a passagem pela zona de contato, parcela dos aglomerados “microbolhas-flocos” atingia a zona de acumulação de lodo (na superfície do reator) e a parcela restante era encaminhada, juntamente com o efluente, à região onde foram instaladas placas planas paralelas, nessa região ocorria a separação final da maior parte dos aglomerados “microbolhas-flocos” com menores velocidades ascensionais, devido às melhores condições hidrodinâmicas lá existentes (escoamento com baixo número de Reynolds). As partículas removidas nessa região também atingiam a superfície do flotador, de onde, após certo tempo de acumulação, eram removidas por raspadores mecânicos de superfície (ver FIGURA 4) e despejadas em canaleta própria para coleta do lodo.

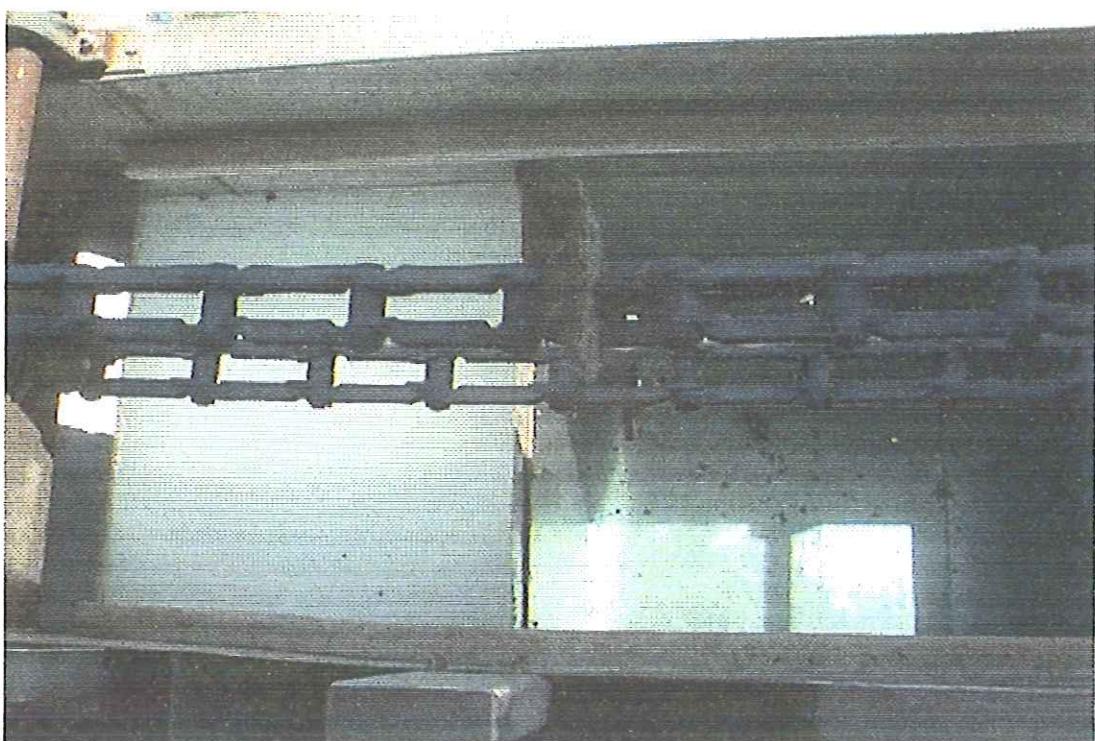


FIGURA 3 - Fotografia da parte superior da unidade de flotação (lado esquerdo da figura). (Para melhor visualização das microbolhas de ar, se utilizou água de abastecimento).

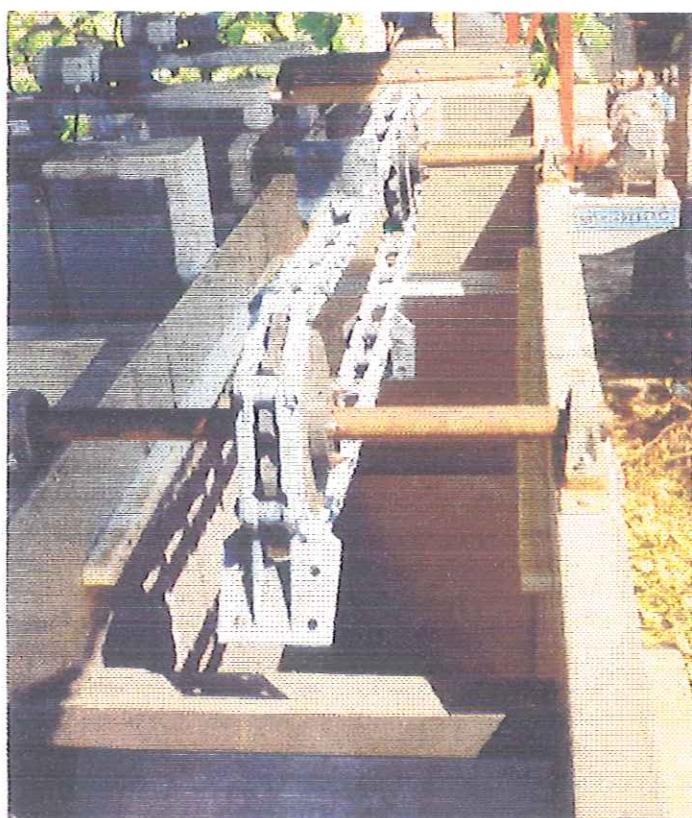


FIGURA 4 - Fotografia do raspador mecânico de lodo

Após sua clarificação, o líquido passava por vertedor controlador do nível d'água no flotador, e era despejado em uma câmara acumuladora, essa unidade era importante para manutenção do volume de líquido bombeado para a câmara de saturação. A vazão excedente era enviada a rede municipal de esgotos.

A parcela do esfluente tratado bombeado para a câmara de saturação, vazão de recirculação do sistema, era introduzida na parte superior da câmara, assim como o ar comprimido proveniente dos compressores. A câmara de saturação possui dimensões de 1,80 m de altura e 0,27 m de diâmetro e contém recheio, composto de tubos de PVC DN 50 mm divididos em peças de 50 mm de altura. A camada de recheio possui altura de 1,2 m e tem por finalidade promover uma maior exposição da água sob pressão ao ar proveniente do compressor. Optou-se pela adoção de recheio tendo em vista o esperado aumento da eficiência de dissolução do ar no líquido em relação a câmaras sem recheio, conforme observado por REALI (1992). Para visualização do nível d'água no interior da câmara foi instalada uma mangueira de plástico transparente resistente a altas pressões. Para o controle de nível de água dentro da câmara, foram empregados eletrodos e pouco abaixo do nível estabelecido pelos eletrodos, ventosas para garantir a expulsão do excesso de ar no interior da câmara de saturação, caso ocorresse falha no dispositivo comandado pelos eletrodos.

O líquido pressurizado após deixar a câmara de saturação passava por um medidor eletromagnético da vazão, responsável pelo controle da vazão de recirculação, e em seguida era introduzido na unidade de flotação através de dispositivos de despressurização da água, composto por quatro registros de agulha, localizados na parte inferior da câmara de flotação.

Todas as operações do sistema de coagulação/flocação/flotação eram realizadas através de quadro de comando eletro-eletrônico.

Essa instalação, concebida da forma descrita anteriormente é mostrada na FIGURA 5 e apresentada com mais detalhes nas FIGURAS 6 e 7.

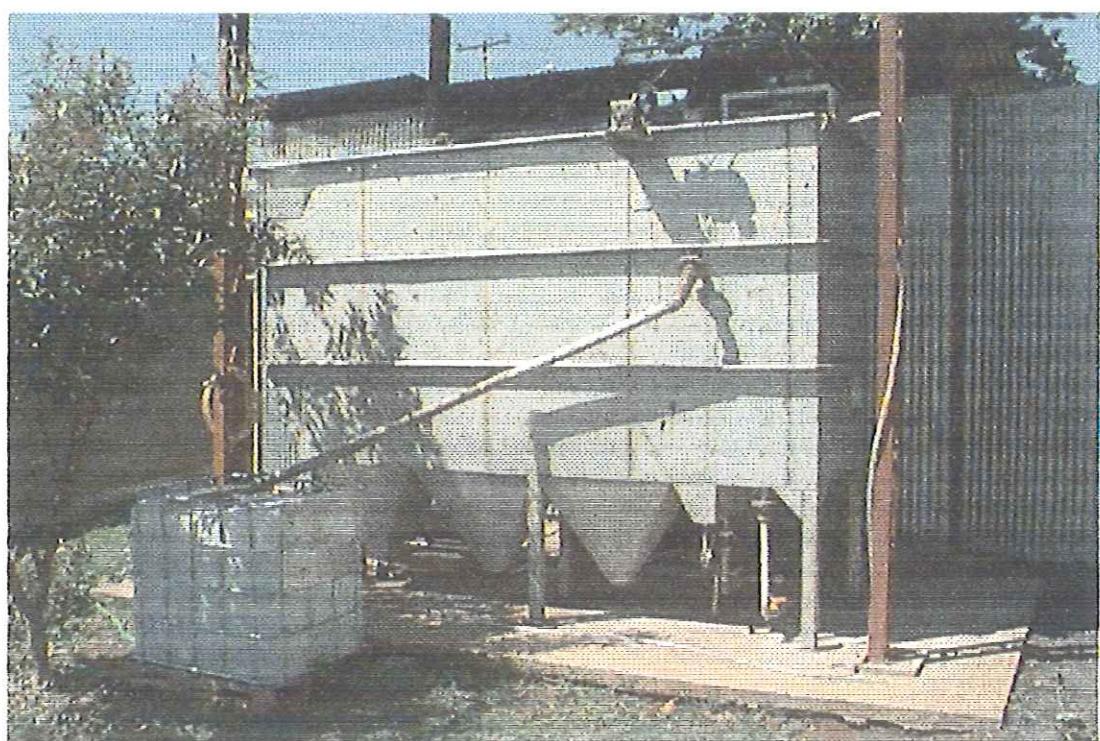


FIGURA 5 – Fotografia da unidade de flotação por ar dissolvido de alta taxa.

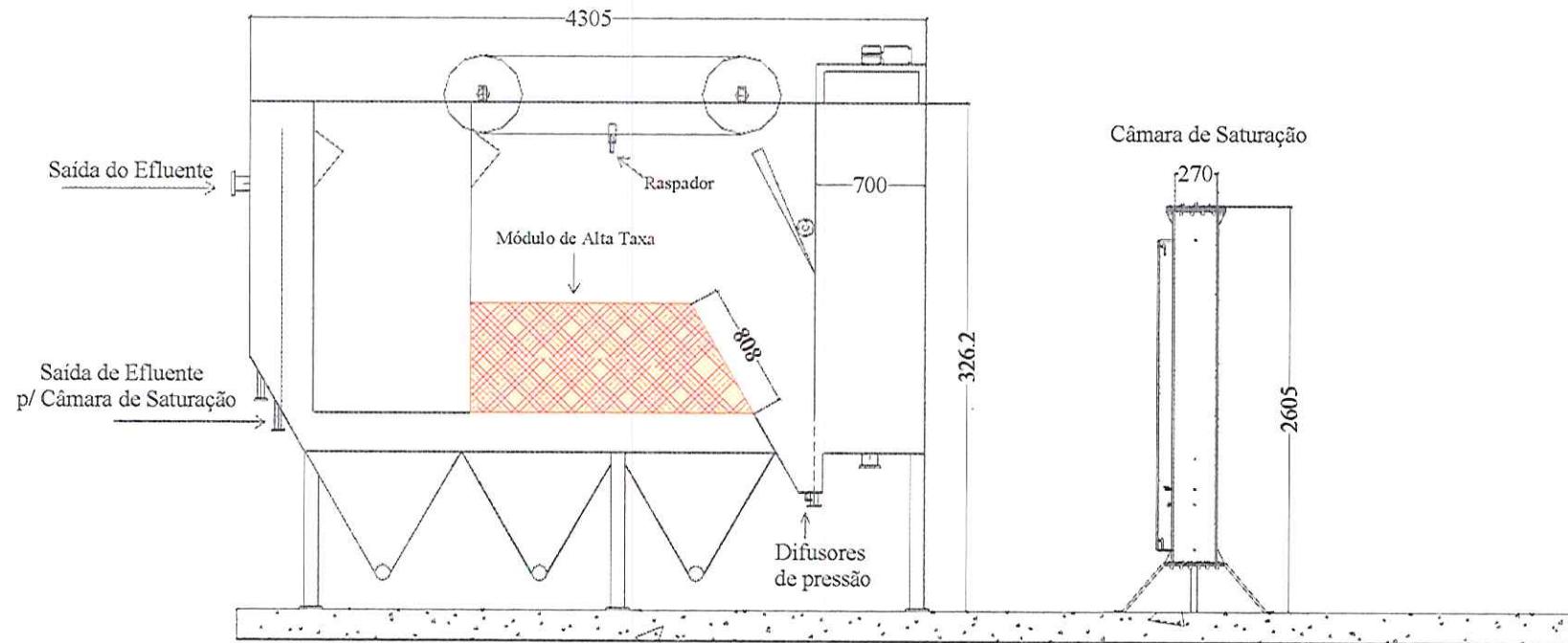


FIGURA 6 –Esquema da unidade piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa e da câmara de saturação (medidas em milímetros)

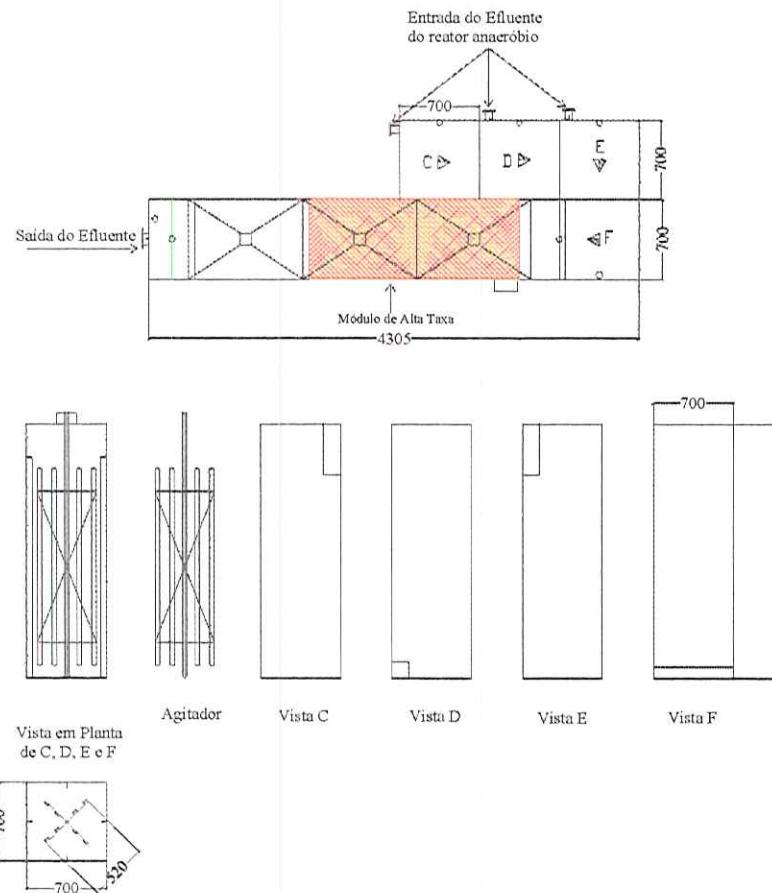


FIGURA 7 – Esquema em planta da unidade piloto FADAT e em corte e planta dos floculadores (medidas em milímetros).

#### 4.2.2 Cálculo de alguns parâmetros utilizados nos ensaios

A vazão de entrada nos floculadores foi calculada em função do tempo de floculação requerido ( $T_f = 20$  minutos) e do volume do sistema de floculação, através da seguinte fórmula:

$$Q_{afluente} = \frac{V_{ol}}{T_f} \quad (4.3)$$

Em que:

$Q_{afluente}$ : vazão afluente à unidade de floculação ( $m^3/h$ );

$V_{ol}$ : volume total dos floculadores utilizados ( $m^3$ );

$T_f$ : tempo de floculação (h)

A taxa de aplicação superficial foi calculada em função da vazão afluente à unidade de flotação ( $Q_{flot}$ ) e da área entre placas do módulo instalado no flotador. A área entre placas pode variar, bastando para isso obstruir as demais placas do módulo de maneira que a vazão afluente à unidade de flotação escoe somente entre as placas desobstruídas.

$$TAS = \frac{Q_{flot}}{A_{Placas}} \quad (4.4)$$

Em que:

$TAS$ : taxa de aplicação superficial ( $m^3/m^2.h$ );

$Q_{flot}$ : vazão afluente à unidade de flotação ( $m^3/h$ ).

$A_{placas}$ : área entre placas ( $m^2$ ).

A vazão afluente à unidade de flotação ( $Q_{flot}$ ) é uma mistura da vazão afluente à unidade de floculação ( $Q_{afluente}$ ) e da vazão de recirculação ( $Q_R$ ). Dessa maneira uma alteração da vazão de recirculação, alteraria a vazão na unidade de flotação e consequentemente a TAS. Para evitar que tal problema ocorresse, foi instalado na saída da última câmara de floculação um sistema de descarte da vazão excedente.

O cálculo de  $Q_{\text{flot}}$  era, então, efetuado através da seguinte fórmula:

$$Q_{\text{flot}} = Q_{\text{afluente}} + Q_R - Q_{\text{descarte}} \quad (4.5)$$

Em que:

$Q_{\text{flot}}$ : vazão afluente à unidade de flotação ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).

$Q_{\text{afluente}}$ : vazão afluente à unidade de flocação ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).

$Q_R$ : vazão de recirculação ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).

$Q_{\text{descarte}}$ : vazão de descarte efluente à unidade de flocação ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).

#### 4.2.3 Descrição dos Principais Equipamentos Acessórios

A instalação piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa conta com os seguintes acessórios:

- Bomba centrífuga multi-estágio Jacuzzi Hidroflex 15H4D10;
- Compressor de ar SCHULZ MSL 10 ML/175;
- Microprocessador-controlador de tamanho e freqüência de onda marca SIEMENS, modelo Micromaster;
- Quatro agitadores com moto-redutores;
- Três medidores de vazão Conaut (Krohne);
- Bomba dosadora;
- Tanques de fibra de vidro para preparo e dosagem de produtos químicos;
- Amortecedores de pulso de vazão.

#### 4.2.4 Reator Anaeróbio de Leito Expandido (Ralex)

O reator anaeróbio de leito expandido (Ralex) tratando esgoto sanitário de bairro vizinho ao Campus USP-São Carlos, estudado pelo Eng. José Almir Rodrigues Pereira em sua pesquisa de doutorado, também fez parte do sistema de tratamento empregado na presente pesquisa.

Segundo PEREIRA (2000), o reator, mostrado na FIGURA 8, possui 14,9 m de altura com volume útil de 31,2  $\text{m}^3$  e está dividido em uma câmara de reação e uma

câmara de sedimentação. A câmara de reação é cilíndrica, com altura útil de 12 m e diâmetro de 1,5 m. A câmara de sedimentação apresenta o formato de uma taça, com 2,9 m de altura, 1,5 m de diâmetro menor e 2,5 m de diâmetro maior. O sistema de tratamento preliminar do esgoto bruto afluente ao reator Ralex é constituído de grades com 2,5 cm de espaçamento entre barras e caixa de areia.

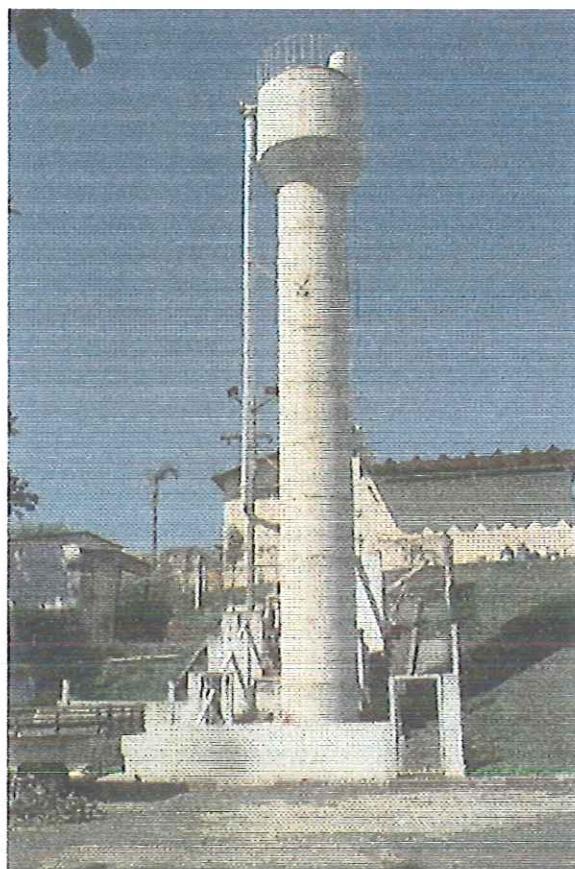


FIGURA 8 – Fotografia do reator anaeróbio de leito expandido (Ralex)

#### 4.3 Outros equipamentos e materiais utilizados

- ◆ Turbidímetro, marca HACH, modelo 2100P;
- ◆ Estufa, fabricante SOC. FABBER LTDA., amplitude de 60 a 280°C;
- ◆ Autoclave, marca PHOENIX, amplitude de 100 a 143°C e 0 a 3 kgf/cm<sup>2</sup>;

- ◆ Reator para digestão, marca HACH, 25 tubos;
- ◆ Mufla, marca EDGCON, modelo 5P FC-1;
- ◆ Bomba de vácuo, marca IBAV, modelo BRD2, série 871073;
- ◆ Membrana fibra vidro 47mm 0,45UM 500/PC Sartorius;
- ◆ Espectofotômetro, marca HACH, modelo DR-2000;
- ◆ Balança analítica QUIMIS, modelo AS210, sensibilidade de 0.0001 g;
- ◆ Espectofotômetro, marca HACH, modelo DR-4000;
- ◆ Vitrarias de uso em laboratório;
- ◆ Ácido sulfúrico: do tipo PA para uso em laboratório.
- ◆ Solução de cloreto férrico:
  - Nome Comercial: Cloreto Férrico;
  - Fórmula Química:  $\text{FeCl}_3$ ;
  - Peso molecular: 162,3;
  - $\text{FeCl}_3(\%)$ : de 38% a 40%;
  - Material insolúvel: máx. 0,10%;
  - Ferro II (Fe II/Fe total) máx. 2,5%;
  - pH: < 1,0;
  - Acidez livre (HCl livre): 1,21%.
  - Solúvel em água;
  - Aspecto líquido;
  - Cor marrom escuro.

#### **4.4 Caracterização fisico-química simplificada do esgoto bruto e do efluente do Ralex ao longo de 24 horas**

A caracterização simplificada do esgoto bruto e do efluente do reator Ralex foi realizada nos dias 23 e 24 de outubro de 2002 pelo aluno **Marcelo Eustáquio de Carvalho**, do Programa de Mestrado do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP e pelo aluno Hélio Rodrigues dos Santos, do Programa de Doutorado do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP.

Foram caracterizados o esgoto sanitário bruto e o efluente do Reator Ralex. As amostras eram coletadas a cada duas horas de intervalo.

As determinações de temperatura, pH, potencial redox, turbidez, alcalinidade, ácidos voláteis e sólidos sedimentáveis foram realizadas logo após a coleta. Em seguida, essas amostras eram conservadas sob refrigeração para posterior caracterização num período máximo de 24 horas, pelos próprios alunos participantes, de DQO bruta, DQO filtrada, fosfato total e filtrado, NTK, nitrogênio amoniacal, ST, SF, SST e SSF no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Água da EESC-USP de acordo com padronização de ensaios descrita no STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER (1998).

#### **4.5 Ensaios Visando a Caracterização do Desempenho da Câmara de Saturação do Sistema de Flotação**

O projeto da câmara de saturação deve ser bastante cuidadoso, de forma a proporcionar a máxima eficiência de dissolução de ar na água, pois a maior parte da energia fornecida ao sistema de flotação é consumida nessa unidade (REALI & CAMPOS, 1992).

Para avaliação do desempenho da câmara de saturação da unidade em estudo, utilizou-se metodologia adequada para obtenção dos valores de “quantidade de ar liberado”, desenvolvida por REALI (1991). De acordo com tal metodologia a capacidade de saturação é obtida em função da pressão na câmara e da temperatura da água. Os equipamentos utilizados na realização dos ensaios foram os seguintes:

- ◆ Seringa metálica marca HOFNER com câmara interna de vidro (empregada na pecuária para vacinação de bovinos) com capacidade de 150 mL;
- ◆ Dispositivo para medida de ar liberado no interior da seringa, constituído de bureta de 50 mL, com divisões de 0,1 mL, lacrada na extremidade superior e ligada através de uma mangueira de plástico transparente a outra bureta de 100 mL, com divisões de 0,2 mL;
- ◆ Barômetro para leitura da pressão atmosférica local;

- ◆ Termômetros para leitura da temperatura do ar na água;
- ◆ Manômetro de mercúrio para a leitura da pressão correta de saturação.

## **PROCEDIMENTO**

Para permitir a introdução da agulha da seringa no interior da câmara de saturação (sob alta pressão) foi previsto um dispositivo contendo um septo de silicone. As etapas da extração foram as seguintes:

### **A - Preparo da seringa:**

A seringa era enchida com água da torneira e em seguida esvaziada, conservando-a para cima, para eliminação total do ar contido no interior da mesma. Após o esvaziamento total da seringa, fechava-se a pinça dando início à coleta de amostra.

### **B - Preparo das buretas:**

Antes do início do ensaio, tanto a bureta de 50 mL quanto a mangueira transparente eram enchidas de água deixando-se o nível d'água chegar no nível de 95,0 mL (V<sub>XO</sub>) na bureta de 100 mL.

### **C – Extração da amostra:**

Através do septo de silicone, a agulha da seringa era introduzida no interior da câmara e, em seguida era aberta a pinça, permitindo a entrada lenta de água (saturada) para o interior da seringa. Após o êmbolo da seringa percorrer uma distância equivalente a 130 mL, a pinça era fechada e em seguida a agulha era introduzida na tampa de silicone da bureta de 50 mL Em seguida era efetuada a descompressão total da amostra abrindo-se a pinça e realizada a precipitação completa (liberação) das bolhas de ar, contida na amostra, através de pequenos toques no corpo da seringa, durante aproximadamente 8 minutos, desse modo, todas as bolhas precipitadas nas paredes do corpo da seringa eram encaminhadas ao topo da mesma.

Após a concentração do volume do ar liberado na parte superior da seringa, procedia-se à transferência do mesmo, da seringa para o interior (topo) da bureta de

50 mL, apertando-se lentamente o êmbolo. Essa operação era realizada bem lentamente, para que não houvesse escape de bolhas de ar para o interior da mangueira transparente. Dessa forma conseguia-se transferir todo o volume de ar da seringa para a bureta de 50 mL. Após a transferência cuidadosa de ar, procedia-se, na sequência, o esvaziamento total da água da seringa, transferindo-a também para a bureta de 50 mL, que automaticamente, a transferia para a bureta de 100 mL através da mangueira.

Durante o esvaziamento total da seringa, era necessária a extração de 50 mL (através de uma pipeta) da bureta de 100 mL, para evitar transbordamento. Após o esvaziamento total da seringa, procedia-se à leitura do volume de ar e de água, igualando os níveis de água das buretas de 100 mL e de 50 mL, utilizando-se a formula seguinte:

$$V_a = V_{x0} - V_{x1} + 50\text{ml} - V_y \quad (4.6)$$

Em que:  
 $V_a$  : volume total de água extraído da seringa (mL);  
 $V_{x0}$  : 95 mL;  
 $V_{x1}$  : volume de água final (mL);  
 $50\text{ml}$  : volume retirado da bureta de 100 mL;  
 $V_y$  : volume total de ar precipitado;

#### **D - Cálculo da saturação em volume “Sv” (mL/L) nas condições ambientais**

$$Sv(\text{mL/L}) = \frac{V_y}{V_a} \quad (4.7)$$

#### **E – Cálculo da saturação em peso (mg/L)**

$$Sp(\text{mg/L}) = \frac{m_{ar} \times 1000(g \rightarrow mg)}{V_a} \quad (4.8)$$

$$m_{ar} = \frac{[M \times V_m \times (P_{atm} - P_v)]}{R \times T} \quad (4.9)$$

$$Sp(\text{mg/L}) = \frac{[472,279 \times V_m \times (P_{atm} - P_v)]}{T \times V_a} \quad (4.10)$$

Em que:  $m_a$  : massa de ar seco (g);  
 $M$  :massa molecular de ar seco (g)  
 $Sp$  : saturação em peso (mg/L);  
 $V_m$  : volume da mistura gasosa {vol. de Ar} (L);  
 $P_{atm}$  : pressão atmosférica (mmHg);  
 $P_v$  :pressão de vapor da água na temperatura dos ensaios (mmHg)  
 $T$  : média da temperatura da mistura (água + ar) (K);  
 $V_a$  : volume de água utilizada no ensaio (L).

#### **4.6 Ensaios realizados com a instalação piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa (FADAT)**

Para tempo de floculação ( $T_f$ ) mantido fixo de 20 minutos, os ensaios inicialmente previstos com a unidade piloto de flotação por ar dissolvido (FADAT) seriam realizados utilizando as seguintes variáveis: dosagens de cloreto férrico de 50mg/L e 70mg/L, taxas de aplicação superficial de 21 m/h e 42 m/h, gradiente médio de velocidade de floculação de  $60\text{ s}^{-1}$ ,  $80\text{ s}^{-1}$  e  $100\text{ s}^{-1}$  e frações de recirculação de 8%, 13% e 18%.

Face as grandes dificuldades encontradas para a colocação e manutenção do reator anaeróbio Ralex em funcionamento, devido às constantes falhas no sistema de recalque e também aos imprevistos que acabaram influenciando diretamente no andamento da pesquisa e consequentemente no cronograma da mesma, resolveu-se alterar a grade de ensaios.

Após a realização e análise dos resultados da primeira bateria de ensaios em que foram estudados para tempo de floculação de 20 minutos, taxa de aplicação superficial de 21m/h e dosagem de 50mg/L de cloreto férrico mantidos fixos, os gradientes médios de velocidade de floculação de  $60\text{ s}^{-1}$ ,  $80\text{ s}^{-1}$  e  $100\text{ s}^{-1}$  variando as frações de recirculação de 8%, 13% e 18%, resolveu-se pela não realização do estudo da velocidade de floculação de  $60\text{ s}^{-1}$  nos ensaios seguintes, uma vez que as velocidades de floculação de  $80\text{ s}^{-1}$  e  $100\text{ s}^{-1}$  forneceram os melhores resultados referente a remoção de turbidez, SST, DQO e fósforo.

Para taxa de aplicação superficial de 21 m/h e frações de recirculação de 8%, 13% e 18% também foi realizado um ensaio sem adição de cloreto férrico.

As coletas de esgoto bruto, efluente do reator Ralex e efluente da unidade de flotação FADAT nunca eram efetuadas aos sábados, domingos, segundas-feiras, feriados e seu dia seguinte tendo em vista a possibilidade das características do esgoto sanitário não serem representativas. Da mesma forma, para evitar a interferência da diluição do esgoto sanitário decorrente de chuvas, não era realizada coleta se houvesse chovido nas 24 h anteriores. Todas as amostras eram coletadas em frascos de 500ml, suficiente para as determinações diárias. Durante a coleta eram medidos o pH, a turbidez e a temperatura das amostras que, em seguida eram conservadas sob refrigeração, por no máximo 24 horas, para posterior caracterização (DQO, sólidos suspensos e fósforo), no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos-USP de acordo com o STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER (1998).

A associação entre os diferentes parâmetros e seus respectivos valores está apresentada na FIGURA 9, que também ilustra a seqüência dos ensaios.

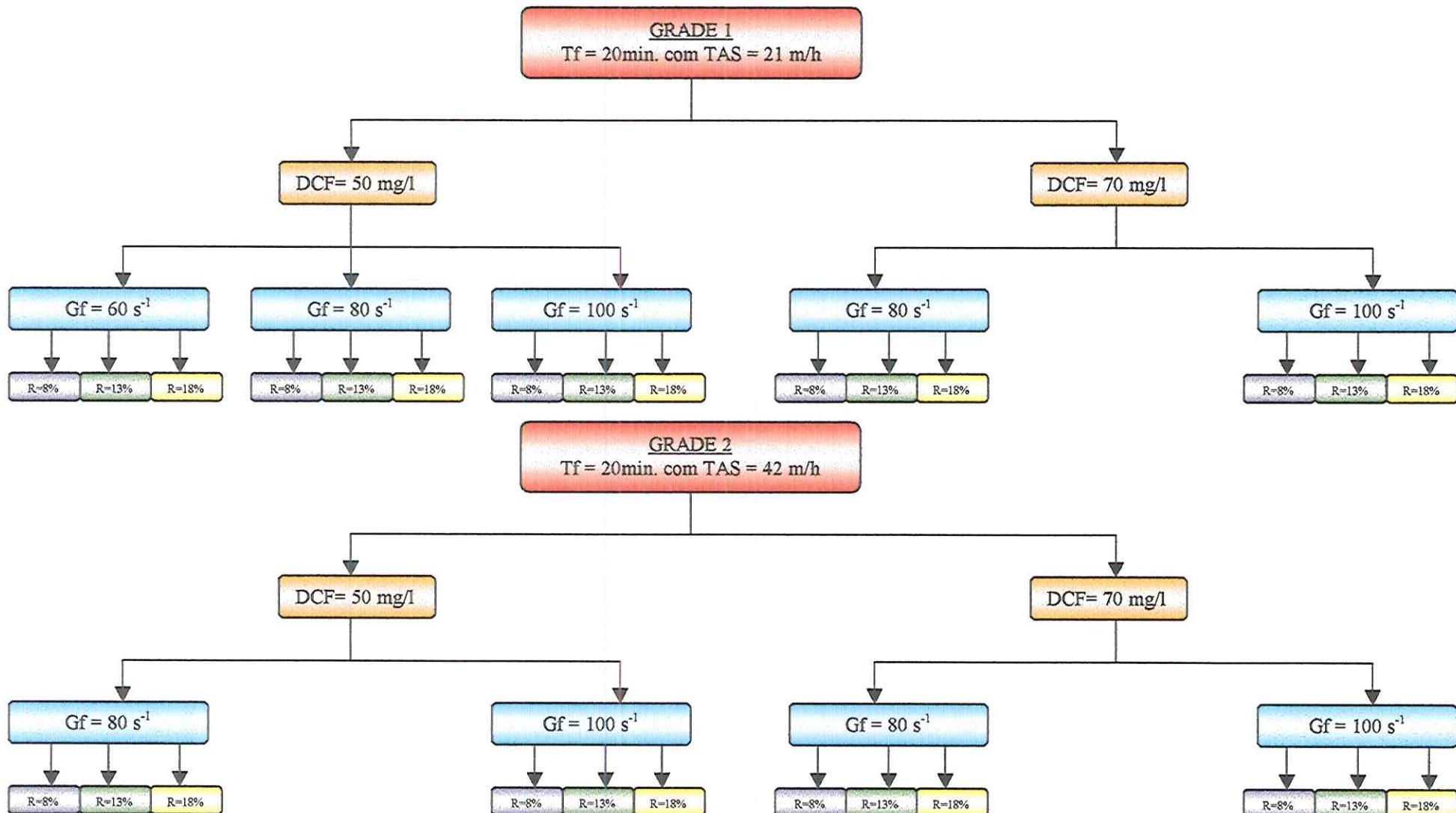


FIGURA 9 - Fluxograma dos ensaios realizados com a instalação piloto FADAT

## 4.7 Operação e Manutenção das Instalações de Pesquisa

### 4.7.1 Monitoramento do reator anaeróbio Ralex

A operação e manutenção do reator anaeróbio eram de suma importância para o bom desempenho da unidade FADAT. Com a finalidade de se estabelecer uma rotina operacional que proporcionasse tal desempenho do reator, foi montado um grupo, ao qual o pesquisador encontrava-se inserido, responsável pelo seu monitoramento.

Os procedimentos diários que faziam parte da rotina operacional do reator anaeróbio Ralex eram os seguintes:

- Vistorias das instalações;
- Limpeza do sistema de tratamento preliminar;
- Leituras do volume de gás e da temperatura ambiente;
- Leituras de voltagem, amperagem e horímetro dos conjuntos motor-bomba do esgoto bruto e de recirculação.

Quinzenalmente eram efetuadas limpezas na unidade de retenção de sólidos, no poço de sucção de esgoto bruto e no poço de recirculação de parte do esgoto tratado. Essa limpeza era efetuada com a utilização de caminhão tipo limpa-fossa, para remoção por sucção do material sedimentado.

Cada membro do grupo ficava responsável pela operação do reator durante sete dias em cada mês.

Durante a realização de todos os ensaios, os seguintes parâmetros referentes ao reator Ralex foram mantidos fixos: vazão de entrada  $Q_e = 6,6 \text{ m}^3/\text{h}$ , vazão de recirculação  $Q_r = 9,5 \text{ m}^3/\text{h}$  e tempo de detenção hidráulico TDH = 4,8 h.

### 4.7.2 Procedimento e monitoramento dos ensaios na instalação piloto de flotação (FADAT)

Os procedimentos adotados durante a operação e monitoração da instalação piloto de flotação FADAT foram os seguintes:

- ✓ Era utilizado um tanque de 600 l para o preparo da solução diluída do cloreto férrico. Durante os ensaios a agitação da solução era ocasionalmente acionada, uma vez que sua solução se mantinha homogênea.
- ✓ A vazão de alimentação da instalação piloto com efluente do reator Ralex foi mantida em 5,6 m<sup>3</sup>/h durante todos os ensaios, conforme a necessidade de vazão para o tempo de floculação adotado de 20 min., e do estudo da taxa de aplicação superficial. A vazão era conferida em medidor eletromagnético e controlada através de válvulas de esfera presentes na linha de alimentação do flotador. Para tal tempo de floculação adotado (20min.), foram escolhidas as duas primeiras câmaras de floculação para a entrada do efluente anaeróbio previamente coagulado. As demais válvulas de esferas eram mantidas fechadas.
- ✓ Era ajustada a dosagem de solução de produto químico (cloreto férrico) através da respectiva bomba dosadora e o consumo do produto químico era minuciosamente acompanhado com o objetivo de se verificar a vazão dosada pela bomba.
- ✓ Os motores das unidades de floculação, a bomba dosadora e o raspador superficial de lodo eram colocados em funcionamento, assim que a unidade FADAT estivesse completamente cheia.
- ✓ No momento em que a instalação piloto começava a fornecer o efluente já clarificado, era iniciado o fornecimento de parcela do líquido clarificado para a câmara de saturação, através do acionamento da bomba de recirculação pressurizada do sistema de saturação de água.
- ✓ A bomba de recirculação pressurizada e o compressor de ar eram ajustados de forma a manter uma pressão em torno de 450 kPa no interior da câmara e a vazão de recirculação desejada no ensaio. Os ajustes eram efetuados através das quatro válvulas de agulha presentes na unidade FADAT e dos registros presentes na bomba de recirculação.
- ✓ O funcionamento da instalação piloto FADAT era minuciosamente acompanhado, pois era necessário que todos os equipamentos estivessem funcionando corretamente e de acordo com os ajustes iniciais.

- ✓ Após a partida do flotador, o sistema era mantido em funcionamento enquanto durassem os diferentes ensaios previstos. Como cada ensaio tinha duração de 12 horas, eram coletadas amostras do esgoto bruto, do efluente do reator Ralex e do líquido clarificado a cada três horas, por um período mínimo de doze horas (cinco amostras).
- ✓ Logo após cada coleta, eram medidos os valores de turbidez e de temperatura de cada amostra, também era verificado o pH do líquido da unidade de coagulação (pH de coagulação) e do líquido clarificado.
- ✓ As coletas se iniciavam sempre às 8:00 da manhã e se estendiam ao longo do dia, em intervalos de 3 horas, até às 20:00. Depois de coletadas as cinco baterias de amostras nesse período de 12 horas, a instalação piloto era ajustada para operar com novos valores de parâmetros a serem estudados. Após a última coleta, realizada às 20:00, era modificado o parâmetro em estudo, sejam gradiente de velocidade de flocação, dosagem de produto químico, taxa de aplicação superficial ou quantidade de ar fornecida ao sistema. Até a próxima coleta, às 08:00 do dia seguinte, a unidade piloto já se encontrava estabilizada com seus novos parâmetros de operação.

#### **4.8 Caracterização físico-química das amostras**

Eram obtidas no final de cada dia de ensaio um total de 15 amostras; sendo cinco amostras do esgoto bruto, cinco do efluente do reator Ralex e cinco do efluente da unidade FADAT. Todas as amostras foram caracterizadas quanto à temperatura, turbidez, DQO, fósforo e sólidos suspensos. Também eram medidos o pH do líquido de coagulação, do líquido de flocação e da amostra clarificada.

Todos as variáveis caracterizadas obedeceram à padronização de ensaios descrita no STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER (1998).

## 5 Resultados e Discussão

No item 5.1. são apresentados os resultados obtidos durante a caracterização físico-química simplificada de esgoto bruto e do efluente do reator Ralex ao longo de 24 horas.

Antes da apresentação e discussão dos resultados dos ensaios realizados na presente pesquisa, é apresentado no item 5.2, uma leve discussão a respeito do desempenho do reator anaeróbio Ralex no período de realização da mesma.

No item 5.3 são apresentados os resultados dos ensaios visando a determinação da eficiência da câmara de saturação da unidade piloto utilizada nesse trabalho.

Os resultados obtidos durante os ensaios com a unidade de coagulação/flocação/flotação por ar dissolvido de alta taxa (FADAT), em que foram investigados taxa de aplicação superficial, gradiente médio de velocidade de flocação e quantidade de ar requerida para a flotação com aplicação de cloreto férreo são apresentados no item 5.4.

## 5.1 Resultados da caracterização físico-química simplificada do esgoto bruto e do efluente do Ralex ao longo de 24 horas

Os resultados ora apresentados provêm de trabalho realizado em parceria com o aluno Hélio Rodrigues dos Santos, do Programa de Doutorado em Hidráulica e Saneamento da EESC-USP.

A caracterização simplificada do esgoto bruto e do efluente do reator Ralex ao longo de 24 horas, realizada nos dias 23 e 24 de outubro de 2002, possibilitou verificar o comportamento do reator nos períodos diurno e noturno, principalmente em relação à presença de fosfato total e DQO, pois são os principais parâmetros de controle em todos os ensaios realizados. Dessa maneira somente estão discutidas e analisadas tais determinações. Vale lembrar que esse ensaio foi realizado no mesmo período em que estava sendo estudado o desempenho da unidade de flotação por ar dissolvido de alta taxa (FADAT).

O GRÁFICO 5.1 apresenta os dados de DQO (amostra não filtrada) do esgoto bruto e do efluente do Ralex. A DQO do esgoto bruto apresentou grande variabilidade ao longo das 24 horas, com média de 535 mg/L. O menor valor de DQO (86 mg/L) foi observado às 06:00 do dia 23/10/2002 e seu maior valor (808 mg/L) às 12:00 do dia 23/10/2002. Entretanto, a variabilidade dos valores de DQO do efluente do Ralex foi bastante menor. Basicamente, a DQO, às 06:00, apresentou os menores valores (102 mg/L, no dia 23/10, e 134 mg/L, no dia 24/10) observados ao longo das 24 horas. A partir deste horário, a DQO tende a aumentar de valor até às 18:00 alcançando valor máximo de 374 mg/L. Desse horário em diante a DQO tende a reduzir gradativamente seu valor, até às 06:00 do dia seguinte. A DQO média efluente ao reator Ralex foi de 273 mg/L com desvio padrão de 86 mg/L. Verifica-se que a eficiência média de remoção de DQO no reator Ralex ao longo de 24 horas foi de 49 %. Considerando-se o período em que eram realizados os ensaios na unidade FADAT, das 08:00 às 20:00, notou-se uma significativa queda do desempenho do reator Ralex, atingindo 36% de eficiência de remoção de DQO.

No GRÁFICO 5.2 são apresentados os valores de fósforo observados no esgoto bruto e no efluente do reator Ralex, no período entre 06:00 de 23 de outubro às 06:00 do dia 24 de outubro de 2002. O comportamento das concentrações de

fósforo no esgoto bruto está bastante definido. A concentração mais elevada (8,7 mg P/L) é observada às 08:00 do dia 23/10/2002 e tende a reduzir-se ao longo do dia e da noite, atingindo valor mínimo às 04:00 (1,8 mgP/L no dia 24/10/99). Entretanto, as concentrações de fósforo observadas no efluente do Ralex apresentam menor amplitude de valores. O menor valor foi observado às 06:00 (23/10, 3,1 mg P/L) e o maior às 12:00 e 14:00 (23/10, 5,9 mg P/L). Os valores de fósforo observados durante as 24 horas apresentaram concentração média de 4,9 mg P/L, com desvio padrão de 0,9 mg/L.

Das 08:00 às 20:00, período dos ensaios na unidade FADAT, a concentração média de fósforo se manteve em 5,4 mgP/L.

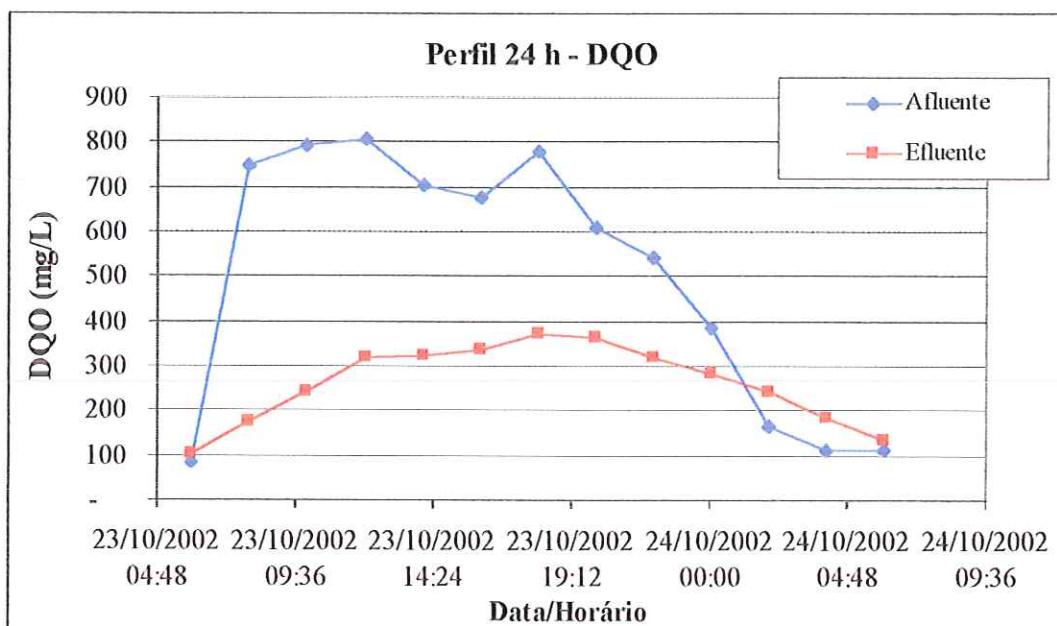


GRÁFICO 5.1 - Concentrações de DQO bruta (amostra não filtrada) observadas durante caracterização físico-química simplificada do esgoto bruto e do efluente do Ralex no período: 06:00 de 23 de outubro às 06:00 do dia 24 de outubro de 2002.

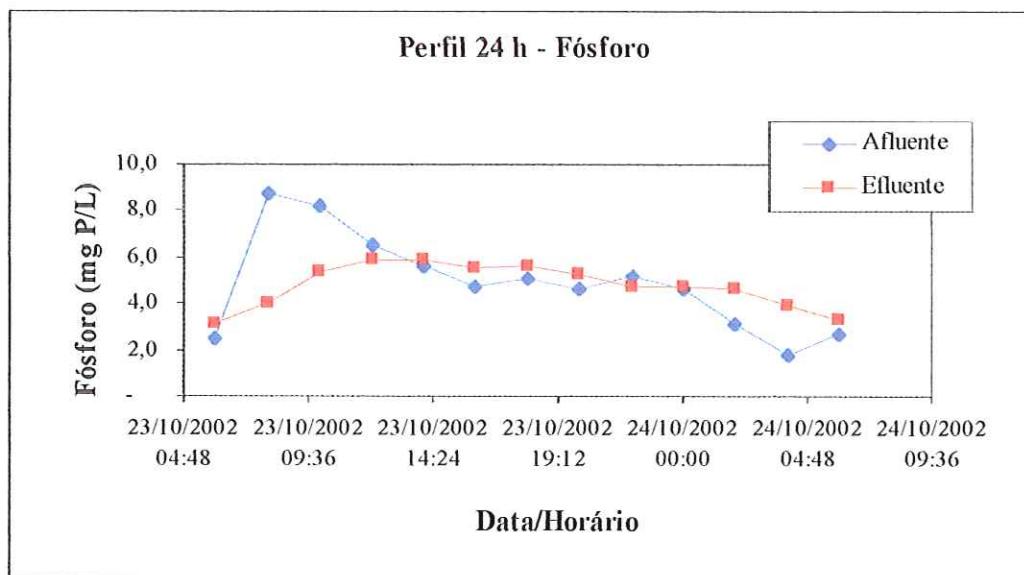


GRÁFICO 5.2 – Concentrações de fosfato total observado durante caracterização fisico-química do esgoto bruto e do efluente do reator Ralex, período: 06:00 de 23 de outubro às 06:00 do dia 24 de outubro de 2002.

## 5.2 Comentários à cerca do desempenho do Reator Anaeróbio de Leito Expandido (Ralex), durante o período de estudo (Somente com base na DQO)

Conforme descrito no item 4.2.4, o reator anaeróbio de leito expandido (Ralex) também fez parte do sistema de tratamento empregado na presente pesquisa, fornecendo o efluente para pós-tratamento na unidade FADAT. Dessa maneira, a operação, manutenção e o consequente desempenho do reator anaeróbio influenciou diretamente na eficiência do pós-tratamento.

Vale ressaltar que a operação e manutenção do reator anaeróbio consistiam em procedimentos diários e quinzenais realizados de acordo com PEREIRA (2000).

A eficiência média de remoção de DQO obtida no reator anaeróbio durante a realização dos ensaios foi de 49% (com residual de até 542 mgO<sub>2</sub>/L), tal eficiência pode ser comprovada com a realização da caracterização simplificada do esgoto bruto e do efluente do reator Ralex ao longo de 24 horas.

PEREIRA (2000), na operação do reator anaeróbio de leito expandido (Ralex) observou remoções médias de 80% de DQO (residual entre 125 e 237 mgO<sub>2</sub>/L) depois de atingido o equilíbrio dinâmico aparente do reator.

As constantes falhas no sistema de recalque, panes no quadro de comando do reator, defeitos nas válvulas de retenção da tubulação de recalque dos conjuntos moto-bomba e vazamentos nas conexões de PVC instaladas entre os registros das tubulações provocavam a interrupção da operação do reator anaeróbio e consequentemente influenciava na eficiência do tratamento.

Os problemas citados anteriormente associados à baixa eficiência do reator Ralex limitou o desempenho do pós-tratamento do esgoto sanitário na unidade de flotação por ar dissolvido de alta taxa.

Antes do início dos ensaios com a unidade FADAT, com o objetivo de melhorar o desempenho do reator anaeróbio, estabeleceu-se uma vazão de entrada no reator anaeróbio de 6,6 m<sup>3</sup>/h, menor que a vazão até então adotada de 10 m<sup>3</sup>/h, e manteve-se a vazão de recirculação em 9,5 m<sup>3</sup>/h, tal procedimento aumentou o tempo de detenção hidráulico no reator Ralex e melhorou eficiência do tratamento.

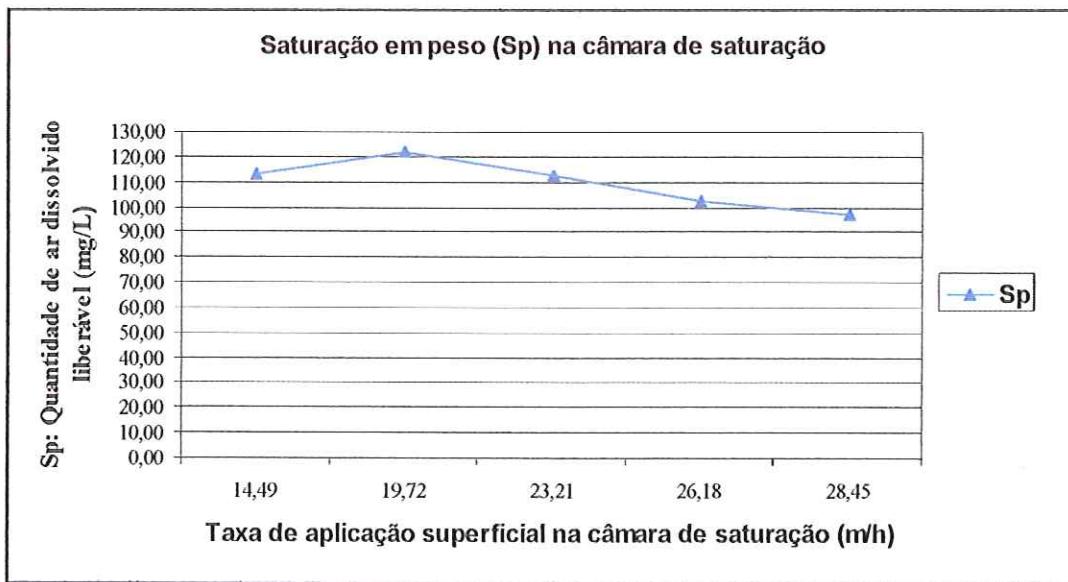
### 5.3 Resultados Obtidos no Estudo da Eficiência da Câmara de Saturação

Um dos parâmetros mais importantes para o projeto de unidades de flotação por ar dissolvido é a quantidade de ar fornecida para a flotação ( $S^*$ ). Segundo REALI & CAMPOS (1992), para que tal parâmetro seja definido é necessário primeiro a escolha de um determinado tipo de câmara de saturação, e, em seguida, que sejam obtidas as curvas quantidade de ar dissolvido/liberável em função da pressão e da temperatura da água, para o tipo de câmara adotado.

De acordo com REALI (1991), para uma dada pressão e temperatura da água, a quantidade de ar fornecida ao processo de flotação ( $S^*$ ) é determinada através do ajuste da vazão de recirculação ( $Q_R$ ) fornecida pela câmara de saturação. O referido autor desenvolveu metodologia capaz de avaliar a eficiência da câmara de saturação em função da pressão e temperatura da água, determinando-se a “quantidade de ar liberado”.

Os resultados dos ensaios realizados com a câmara de saturação utilizada na presente pesquisa de acordo com a metodologia desenvolvida por REALI (1991) são apresentados na TABELA 1 e no GRÁFICO 5.3.

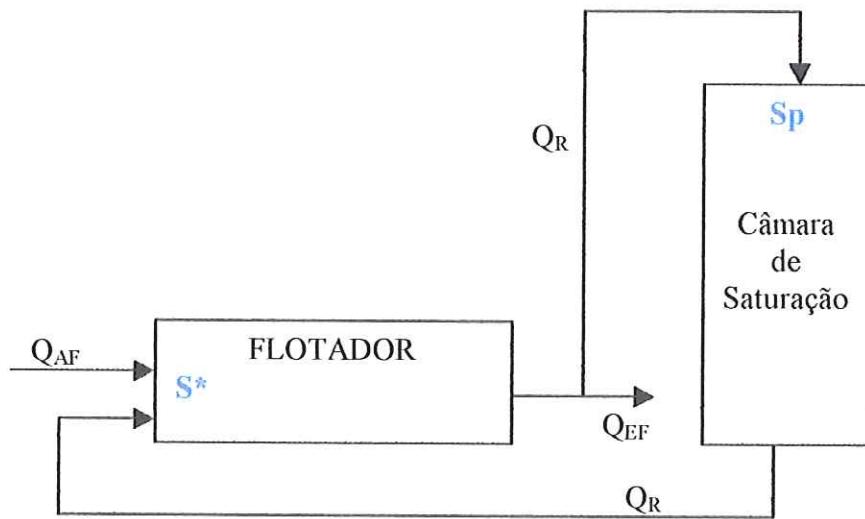
TABALA 1 - Quantidade de ar na câmara de saturação ( $S_p$ ) para pressão de saturação ( $P_{sat}$ ) =  $450 \pm 50$  kPa e temperatura de  $23 \pm 1$  °C.



**GRÁFICO 5.3 – Quantidade de ar na câmara de saturação (Sp) em função da taxa de aplicação superficial (m/h) para pressão de saturação  $P_{sat} = 450 \pm 50$  kPa e temperatura de  $23 \pm 1$  °C.**

Através da análise dos resultados, nota-se um desempenho bastante satisfatório da câmara estudada, para a faixa de taxa de aplicação superficial adotada (14,5 a 28,5 m/h). A capacidade média de saturação nessas condições foi de 109,40 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente recirculado. As taxas usuais aplicadas nesse tipo de câmara de saturação são adotadas na faixa de 35 a 100 m/h. Porém no presente estudo não foi possível testar taxas mais elevadas devido às limitações do recalque à câmara de saturação (bombas com baixa capacidade).

Para o cálculo da quantidade de ar fornecida para a flotação (S\*) em função da vazão de recirculação, deve-se ajustar a quantidade de ar presente na câmara de saturação (Sp), através do valor da recirculação (R), da seguinte maneira:



Em que:

$Q_{AF}$  = vazão afluente ao flotador ( $m^3/h$ );

$Q_R$ : vazão de recirculação ( $m^3/h$ );

$Q_{EF}$  = vazão efluente ao flotador ( $m^3/h$ );

$S^*$  = quantidade de ar fornecida para a flotação ( $mg/L$ );

$Sp$  = Quantidade de ar na câmara de saturação ( $mg/L$ ).

$$(Q_{AF} + Q_R)S^* = S_p Q_R$$

$$S^* = \frac{S_p Q_R}{Q_{AF} + Q_R}$$

$$Q_R = R Q_{AF}$$

$$S^* = \frac{S_p R Q_{AF}}{Q_{AF} + R Q_{AF}}$$

$$S^* = \frac{S_p R}{1 + R}$$

$$S^* = S_p \left( \frac{R}{1 + R} \right) \quad (5.1)$$

Os valores da quantidade de ar fornecida para a flotação ( $S^*$ ) nos ensaios realizados no presente trabalho são apresentados na TABELA 2.

TABELA 2 – Quantidade de ar fornecida para o flotador. Pressão de saturação ( $P_{sat}$ ) = 450 kPa e temperatura de  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ .

Recirculação (R)	8%	13%	18%
$S^*$ (g de ar/m <sup>3</sup> de efluente)	8,1	12,6	16,7

## 5.4 Resultados dos ensaios realizados utilizando unidade piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa (FADAT)

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a operação da instalação piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa (FADAT) com escoamento contínuo, com aplicação de cloreto férrico como coagulante.

Deve-se ressaltar que essa fase da pesquisa envolveu preliminarmente a montagem e calibração de todas as unidades e equipamentos necessários para a operação da instalação FADAT.

Todos os resultados apresentados nesse item se referem aos ensaios realizados em que se mantiveram fixos o tempo de flocação ( $T_f$ ) de 20 minutos e a pressão de saturação ( $P_{sat}$ ) de 450 kPa. Foram testadas duas diferentes taxas de aplicação superficial (21 m/h e 42 m/h), duas dosagens de cloreto férrico (50mg/L e 70 mg/L), inicialmente três ( $60\text{ s}^{-1}$ ,  $80\text{ s}^{-1}$  e  $100\text{ s}^{-1}$ ) e depois dois ( $80\text{ s}^{-1}$  e  $100\text{ s}^{-1}$ ) valores de gradiente médio de velocidade de flocação. Em todos os ensaios também foram estudadas as quantidades de ar fornecidas para a flotação ( $S^*$ ), através da variação dos seguintes valores de recirculação: 8% no ensaio 1, 13% no ensaio 2 e 18% no ensaio 3; que correspondem respectivamente a 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente, tais valores de quantidade de ar foram obtidos mediante ensaios realizados visando a determinação da eficiência da câmara de saturação utilizada no presente trabalho (ver item 5.3).

As Tabelas 3.1 a 3.9 apresentam os valores médios de turbidez, sólidos suspensos (SST), DQO e fósforo presentes no esgoto bruto, no efluente do reator Ralex e no efluente da unidade piloto FADAT ao longo das 12 horas de ensaio. Também são apresentadas nessas Tabelas, para cada horário de coleta, as eficiências médias de remoção dessas variáveis em cada unidade componente do sistema de tratamento, bem como no sistema completo, constituído pelo reator Ralex seguido da unidade FADAT. Os Gráficos de 5.4 a 5.74 apresentam as leituras de turbidez e as caracterizações de DQO, fósforo e sólidos suspensos do esgoto bruto, do efluente do reator Ralex e do efluente da unidade piloto FADAT para cada horário de coleta e as eficiências médias de remoção obtidas no reator Ralex e na unidade FADAT ao longo das 12 horas de ensaio.

Foi realizado também um ensaio sem adição de cloreto férrico, com vistas a analisar a influência da coagulação/flocação no processo da flotação. Os resultados são apresentados na tabela 3.10 e nos gráficos 5.75 a 5.83.

#### 5.4.1 Resultados dos ensaios com taxa de aplicação superficial de 21m/h

Nas tabelas de 3.1 a 3.5 são apresentados os resultados dos ensaios realizados com emprego de taxa de aplicação superficial de 21m/h. Foram testadas dosagens de cloreto férrico de 50mg/L e 70 mg/L, gradientes médios de velocidade de flocação de  $60\text{ s}^{-1}$ , somente no primeiro ensaio,  $80\text{ s}^{-1}$  e  $100\text{ s}^{-1}$  nos demais ensaios e quantidades de ar para a flotação de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> efluente (ensaio 2); e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> efluente (ensaio 3).

Na figura 10 encontra-se apresentado um fluxograma ilustrativo dos ensaios realizados com aplicação de taxa de 21 m/h e tempo de flocação de 20 minutos na unidade FADAT.

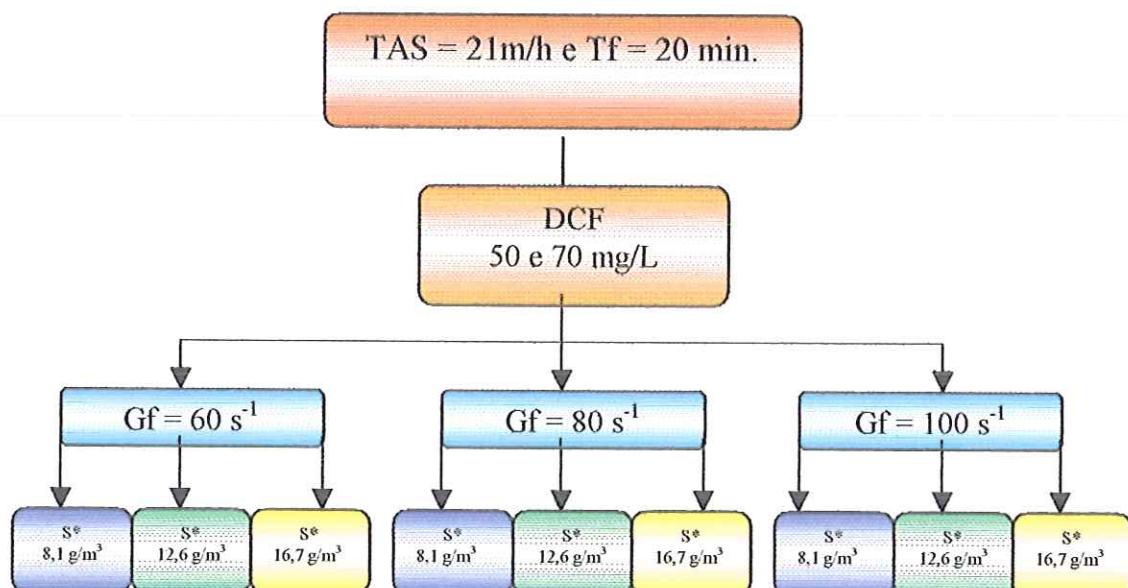


FIGURA 10 - Fluxograma dos ensaios realizados com a instalação piloto FADAT, utilizando taxa de aplicação superficial de 21m/h,  $P_{sat}= 450\text{ kPa}$ , dosagens de cloreto férrico de 50mg/L e 70 mg/L, gradientes médios de velocidade de flocação de  $60\text{ s}^{-1}$ ,  $80\text{ s}^{-1}$  e  $100\text{ s}^{-1}$ . Quantidade de ar fornecida para a flotação ( $S^*$ ): 8,1; 12,6 e 16,7g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

#### **5.4.1.1 Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo, utilizando DCF de 50 mg/L, Gf de 60 s<sup>-1</sup>**

A Tabela 3.1 apresenta os resultados obtidos na única fase da pesquisa em que foi estudado o gradiente médio de velocidade de flocação de 60 s<sup>-1</sup>. Para tempo de flocação (Tf) de 20 min., taxa de aplicação superficial (21 m/h), dosagem de cloreto férreo (DCF) de 50 mg/L e gradiente médio de velocidade de flocação de 60 s<sup>-1</sup>, mantidos fixos, foram investigados os valores de 8,1g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 1; 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 2 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 3.

As características físico-químicas do esgoto bruto e do efluente do reator Ralex variaram ao longo do dia, entretanto, as condições observadas para turbidez, SST e fósforo nos três ensaios realizados foram, na média, semelhante. Em relação a DQO média observada durante a caracterização do esgoto bruto no ensaio 3 ao longo de 12 horas, verifica-se uma diferença significativa se comparada aos valores médios observados nos ensaios 1 e 2. Conseqüentemente, o efluente do reator Ralex no ensaio 3 também apresentou valores mais baixos de DQO.

Através da análise da Tabela 3.1 e dos Gráficos 5.4 a 5.11, pode-se observar que, em relação a unidade FADAT, aparentemente o emprego de 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente forneceu resultados ligeiramente melhores para turbidez, SST e DQO que o ensaio com aplicação de 8,1g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

O fornecimento de 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente na unidade FADAT proporcionou a melhor média de remoção (69%) de turbidez (residual entre 13,1 e 107 uT) e de SST (63%) (residual entre 31,9 a 80,5 mg/L de SST) ao longo das 12 horas de ensaio. No que se refere à eficiência de remoção de DQO, a utilização de 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente também forneceu o melhor resultado de eficiência média obtido pela unidade FADAT (54%, com residual entre 64 e 297 mgO<sub>2</sub>/L). O melhor resultado no que diz respeito à eficiência média de remoção de fósforo ao longo das 12 horas de ensaio, 44% (P residual entre 0,5 e 5,5 mgP/L), foi obtido pela unidade FADAT utilizando-se 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

Embora o fornecimento de 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente tenha proporcionado ligeira melhora no desempenho da FADAT, o fornecimento de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de

efluente apresentou resultados bastante próximos, com remoções médias de 61% turbidez (residual entre 22,1 e 105 uT), de 56% de SST (residual entre 42 a 78 mg/L de SST), de 47% de DQO (residual entre 96 e 317 mgO<sub>2</sub>/L) e de 33% de fósforo (P residual 1,9 e 5,0 mgP/L).

O comportamento da unidade piloto FADAT nos três ensaios realizados ao longo de 12 h de operação (8h às 20h) foi semelhante em relação aos valores médios de turbidez, SST e fósforo. Conforme comentado anteriormente em relação aos valores médios de DQO observados no esgoto bruto e no efluente do reator Ralex no ensaio 3, a DQO média caracterizada no efluente da FADAT também resultou em valor significativamente menor se comparada aos valores médios observados nos ensaios 1 e 2. A maior eficiência de remoção dos parâmetros analisados era obtida sempre às 8h e a menor eficiência era observada entre 14 e 17 h. Considerando a concentração média final dos parâmetros, foram observados os seguintes intervalos de remoções nos três ensaios: de 61 a 69% de turbidez (residual entre 68 e 73 uT), de 49 a 63% de SST (residual entre 63 a 68 mg/L de SST), de 47 a 54% de DQO (residual entre 70 e 239 mgO<sub>2</sub>/L) e de 27 a 44% de fósforo (P residual entre 3,0 e 4,0 mgP/L).

Considerando a eficiência global do sistema de tratamento Ralex-FADAT observa-se que os três valores de quantidade de ar fornecido para a flotação (8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente) apresentaram eficiências de remoção bastante semelhantes, sendo que no ensaio 1, com aplicação 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente, foram obtidas as seguintes eficiências médias de remoção: 75% de turbidez , de SST de 72%, de DQO de 57 % e de fósforo de 43 %.

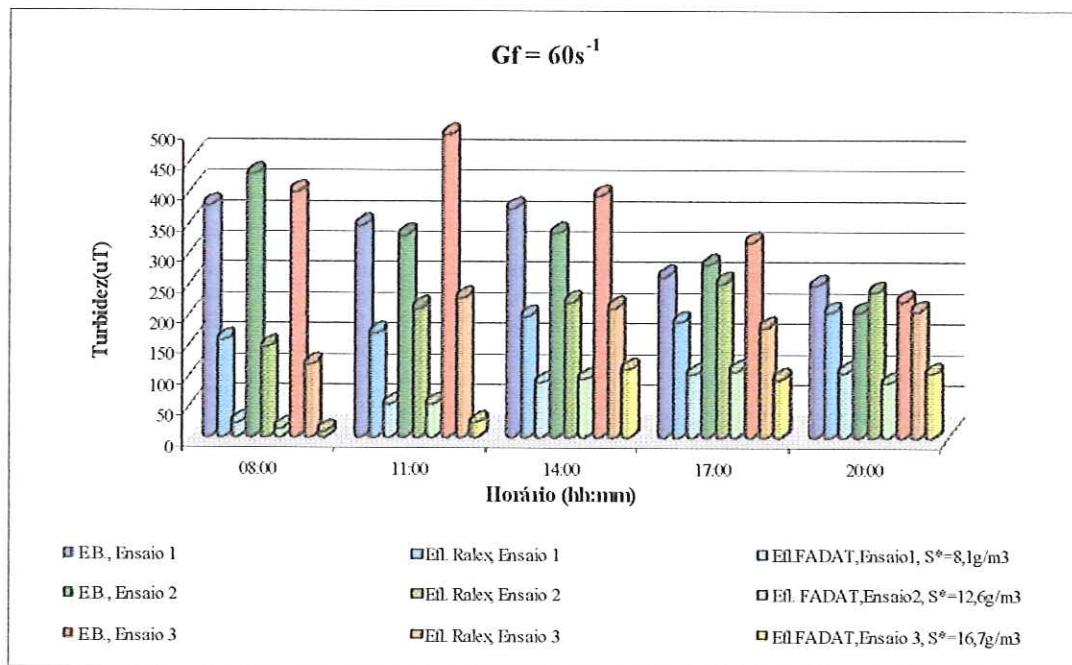


GRÁFICO 5.4 - Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 60 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

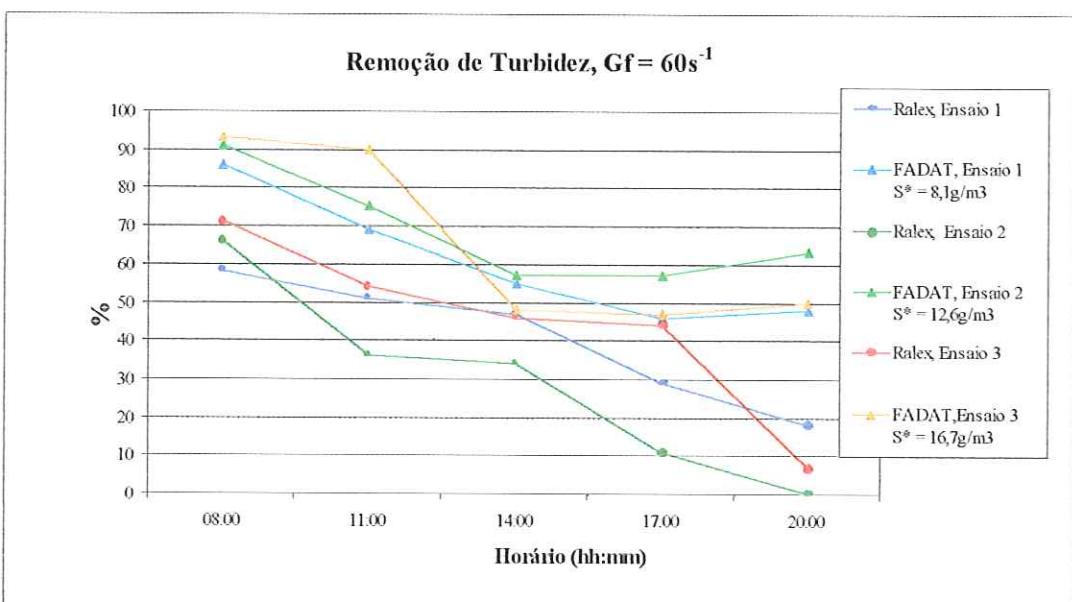
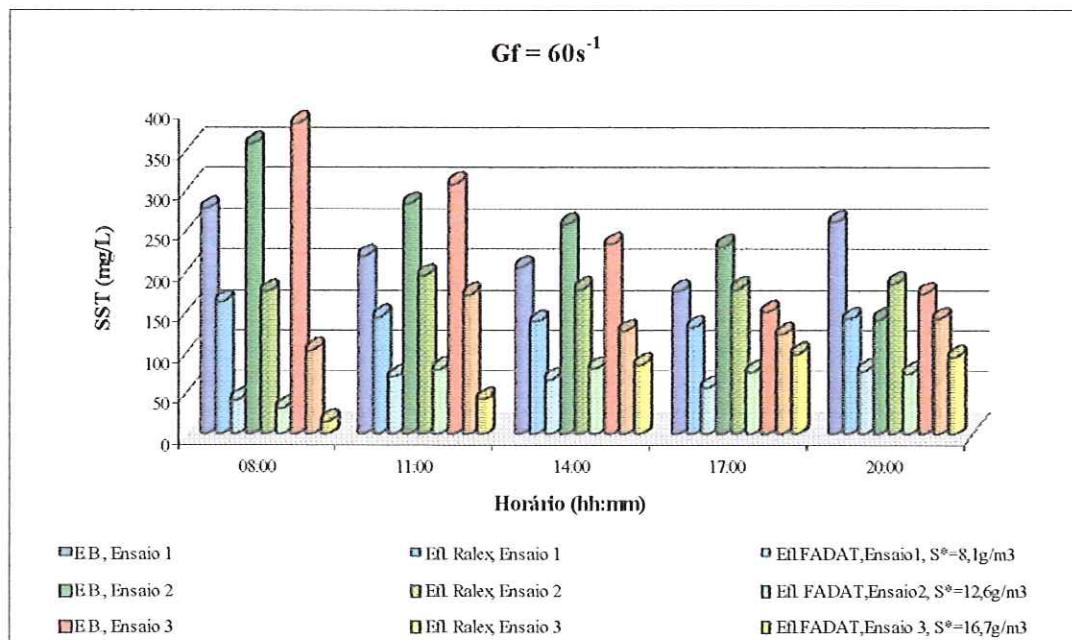
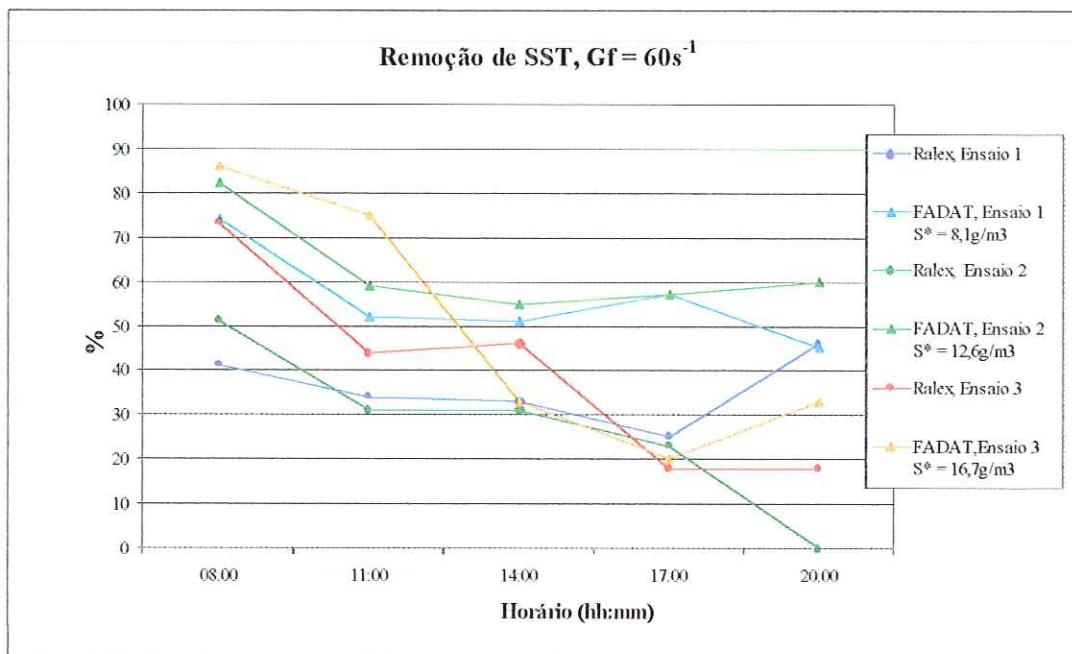


GRÁFICO 5.5- Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 60 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.



**GRÁFICO 5.6 - SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 60 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.**



**GRÁFICO 5.7- Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT** Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 60 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

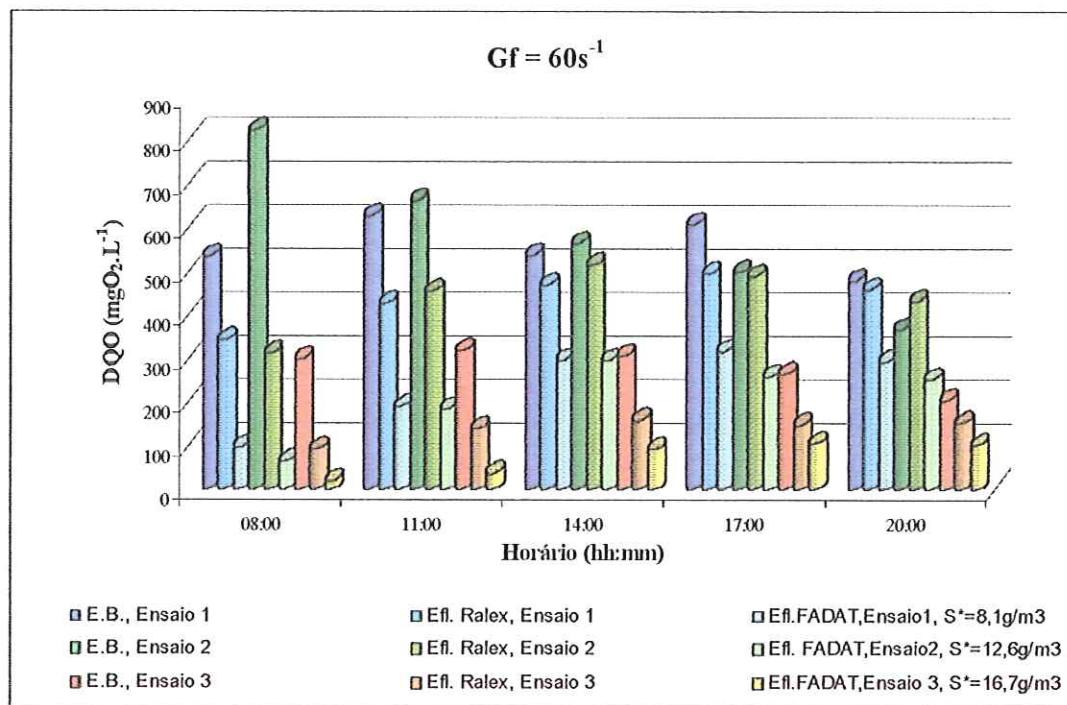


GRÁFICO 5.8 - Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 60 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

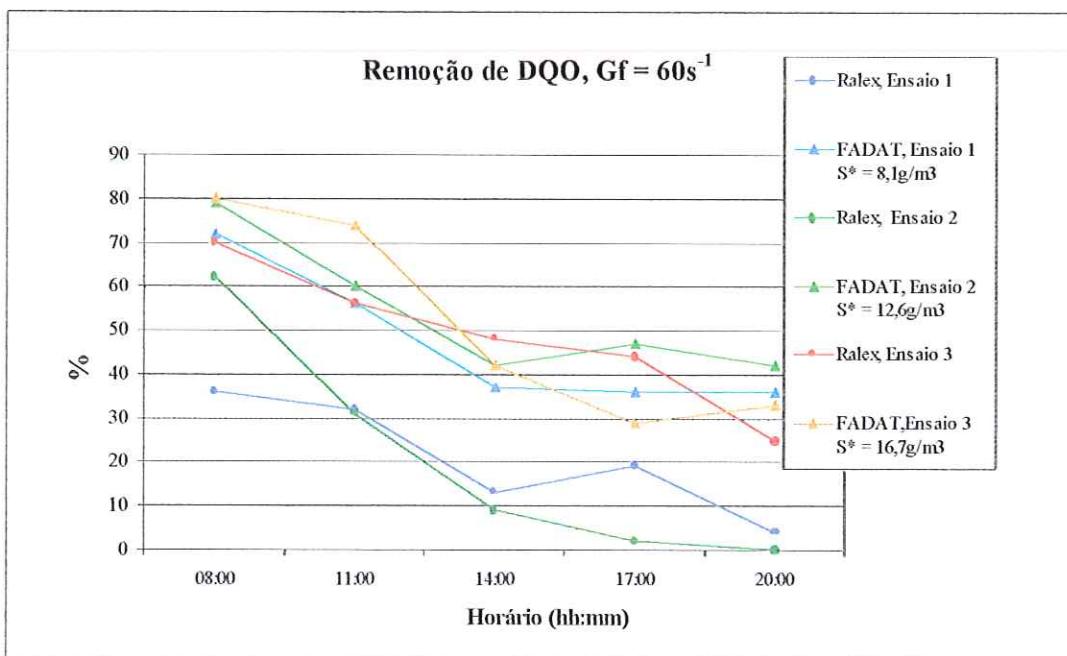
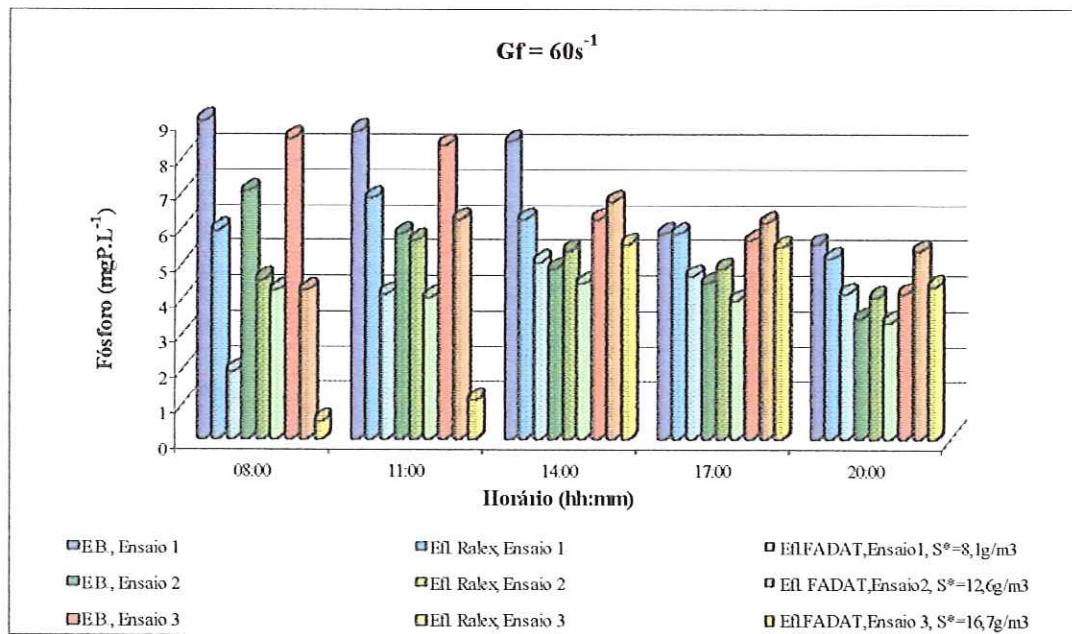
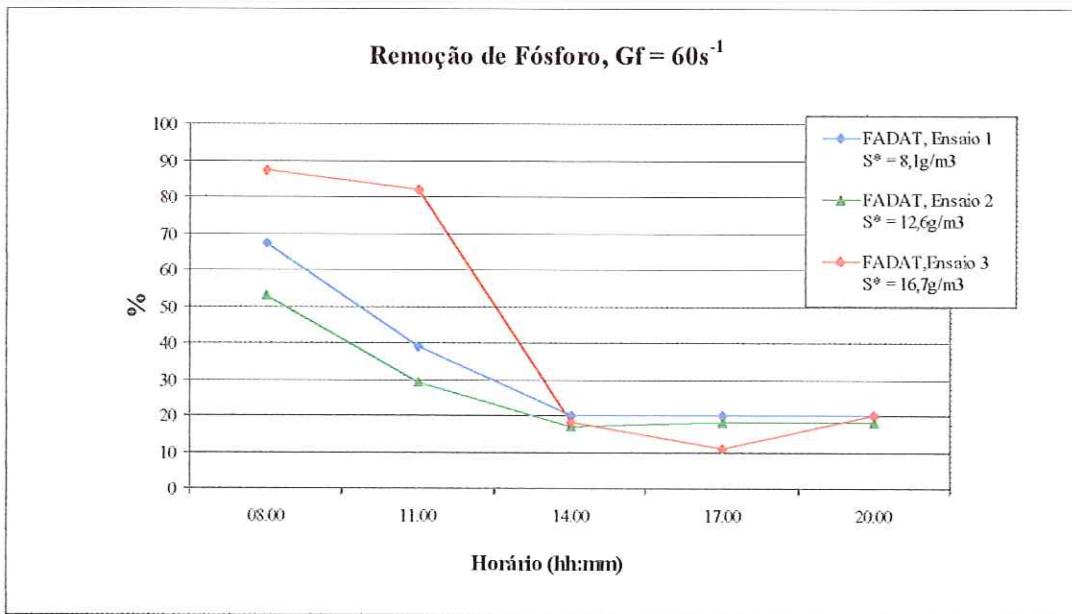


GRÁFICO 5.9 - Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 60 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.



**GRÁFICO 5.10 -** Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20$  min.;  $P_{sat} = 450$  kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L;  $G_f = 60\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.



**GRÁFICO 5.11 -** Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex. Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20$  min.;  $P_{sat} = 450$  kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L;  $G_f = 60\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

TABELA 3.1 - Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; G<sub>f</sub> = 60 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 3)

G <sub>f</sub> = 60 s <sup>-1</sup>												
	Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> l <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Média ao longo das 12 h (EB)	320	314	364	227	253	249	558	584	279	7	5	7
Média ao longo das 12 h (Efl. Ralex)	182	212	187	143	182	133	439	441	138	6	5	6
Média ao longo das 12h(Efl. FADAT)	73	71	68	63	68	67	239	211	70	4	4	3

Tempo (h)	Sistema	Eficiência de Remoção %												
		Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> l <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)			
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
08:00	Ralex	58	66	71	41	51	73	36	62	70	35	35	51	
	FADAT	86	91	93	74	82	86	72	79	80	67	53	87	
	Ralex + FADAT	94	97	98	85	91	96	82	92	94	79	70	94	
11:00	Ralex	51	36	54	34	31	44	32	31	56	22	4	25	
	FADAT	69	75	90	52	59	75	56	60	74	39	29	82	
	Ralex + FADAT	85	84	95	68	72	86	70	72	89	52	32	86	
14:00	Ralex	47	34	46	33	31	46	13	9	48	26	-9	-9	
	FADAT	55	57	48	51	55	33	37	42	42	20	17	18	
	Ralex + FADAT	77	72	72	67	69	64	45	47	70	41	10	11	
17:00	Ralex	29	11	44	25	23	18	19	2	44	-1	-10	-9	
	FADAT	46	57	47	57	57	20	36	47	29	20	18	11	
	Ralex + FADAT	61	62	70	68	67	34	48	48	60	19	10	4	
20:00	Ralex	18	-16	7	46	0	18	4	-17	25	7	-18	-30	
	FADAT	48	63	50	45	60	33	36	42	33	20	18	20	
	Ralex + FADAT	57	56	53	70	47	45	39	32	50	25	4	-3	
Média ao longo das 12 h (Ralex)		41	26	44	36	27	40	21	17	49	18	1	6	
Média ao longo das 12 h (FADAT)		61	69	65	56	63	49	47	54	52	33	27	44	
Média ao longo das 12h(Ralex+FADAT)		75	74	78	72	69	65	57	58	73	43	25	38	

#### **5.4.1.2 Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo, utilizando DCF de 50 mg/L, Gf de 80 s<sup>-1</sup>**

Na Tabela 3.2 encontram-se as concentrações residuais médias de turbidez, DQO, fósforo e SST, obtidas no ensaio realizado em que foi avaliado o gradiente médio de velocidade de flocação de 80 s<sup>-1</sup>. Para tempo de flocação (Tf) de 20 min., taxa de aplicação superficial (21 m/h), dosagem de cloreto férrico (DCF) de 50 mg/L e gradiente médio de velocidade de flocação de 80 s<sup>-1</sup>, mantidos fixos, foram investigados valores de quantidades de ar para a flotação de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 3).

As características físico-químicas do esgoto bruto e do efluente do reator Ralex observadas nos ensaios 1 e 2 foram semelhantes e apresentaram ao longo de 12 h de ensaio, valores médios próximos. No ensaio 3 apesar do esgoto bruto apresentar valores semelhantes aos caracterizados nos ensaios 1 e 2, o melhor desempenho do reator Ralex forneceu um efluente de melhor qualidade, com valores médios de turbidez, SST e DQO menores.

Analizando-se a Tabela 3.2 e os Gráficos 5.12 a 5.19, observa-se que, a utilização de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente proporcionou a melhor média de remoção de turbidez na unidade FADAT (76%, com residuais de 3,78 a 75,1 uT). Da mesma maneira, com aplicação de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente, a eficiência média de remoção de SST na unidade FADAT foi de 64% com residual de 8,1 a 76,8 mg/L de SST. Em relação à eficiência de remoção de DQO, o fornecimento de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente proporcionou a melhor média de remoção na unidade FADAT (66%, com residuais entre 29 e 175 mgO<sub>2</sub>/L). Quanto à remoção de fósforo, observa-se que a melhor média de remoção ao longo de 12 horas (60%, com P residual entre 0,4 e 3,7 mgP/L), foi obtida empregando-se também 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

A qualidade do efluente da unidade piloto FADAT apresentou, ao final de 12 h de operação, pequenas variações de turbidez, SST, DQO e fósforo nos três ensaios realizados. As seguintes médias foram encontradas: turbidez entre 42 e 54 uT, SST entre 43 e 61 mg/L de SST, DQO entre 113 e 168 mgO<sub>2</sub>/L e fósforo entre 2 a 3 mgP/L.

Considerando-se o sistema Ralex-FADAT nota-se que com aplicação de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente, o mesmo apresentou as seguintes eficiências médias de remoção ao longo de 12 h de operação: 85% de turbidez, 81% de SST, 82% de DDQ e 60% de fósforo. Nessa condição os residuais médios ao longo de 12 h no efluente final foram: 42 uT de turbidez, 43 mg/L de SST, 113 mgO<sub>2</sub>/L de DQO e 2 mgP/L de fósforo.

Vale salientar que o aumento do valor de Gf de 60 s<sup>-1</sup> para 80 s<sup>-1</sup> resultou em menor quantidade de ar requerida para a flotação de alta taxa. Conforme comentado anteriormente, para Gf de 60 s<sup>-1</sup>, o fornecimento de 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente proporcionou resultados ligeiramente melhores, enquanto que para Gf de 80 s<sup>-1</sup>, o emprego de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente já foi suficiente para fornecer os melhores resultados de remoção do sistema.

---

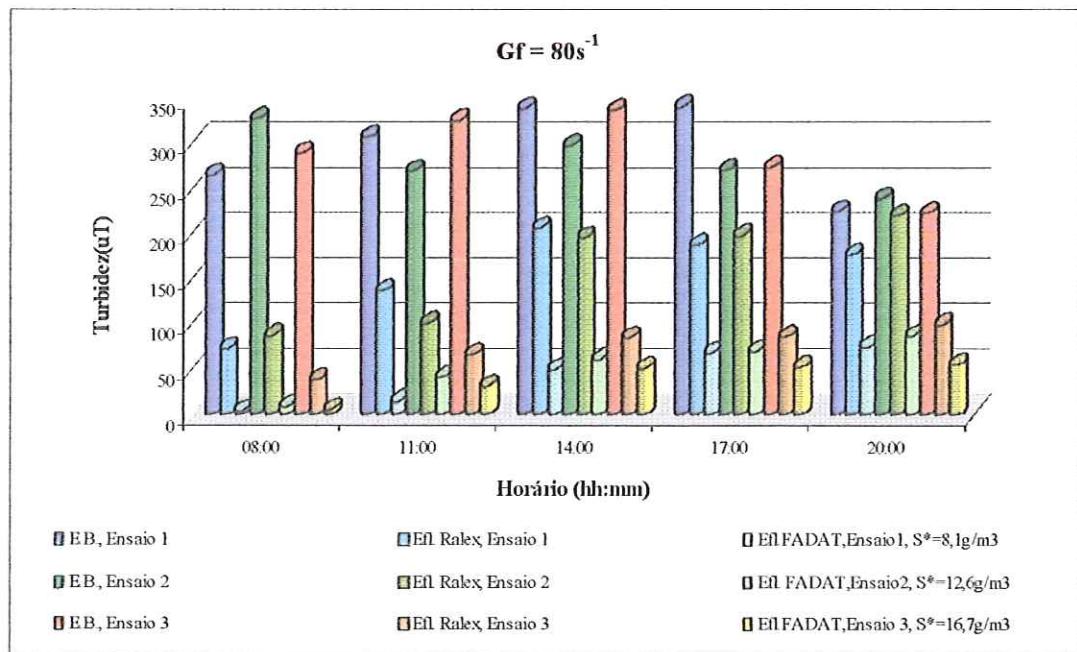


GRÁFICO 5.12 - Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.;  $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

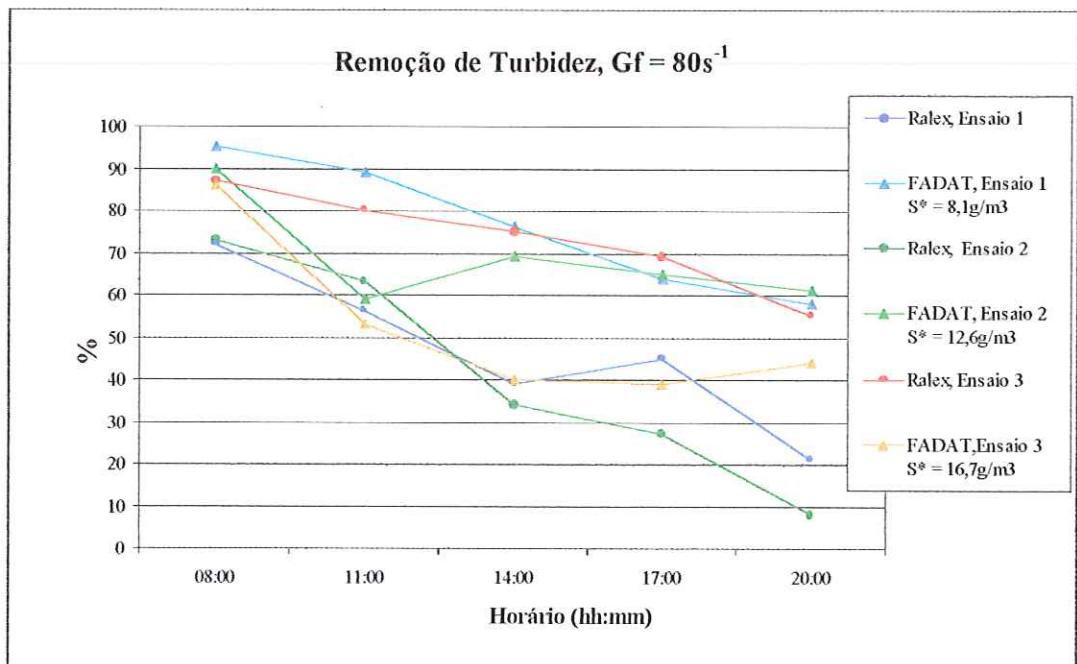


GRÁFICO 5.13- Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.;  $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

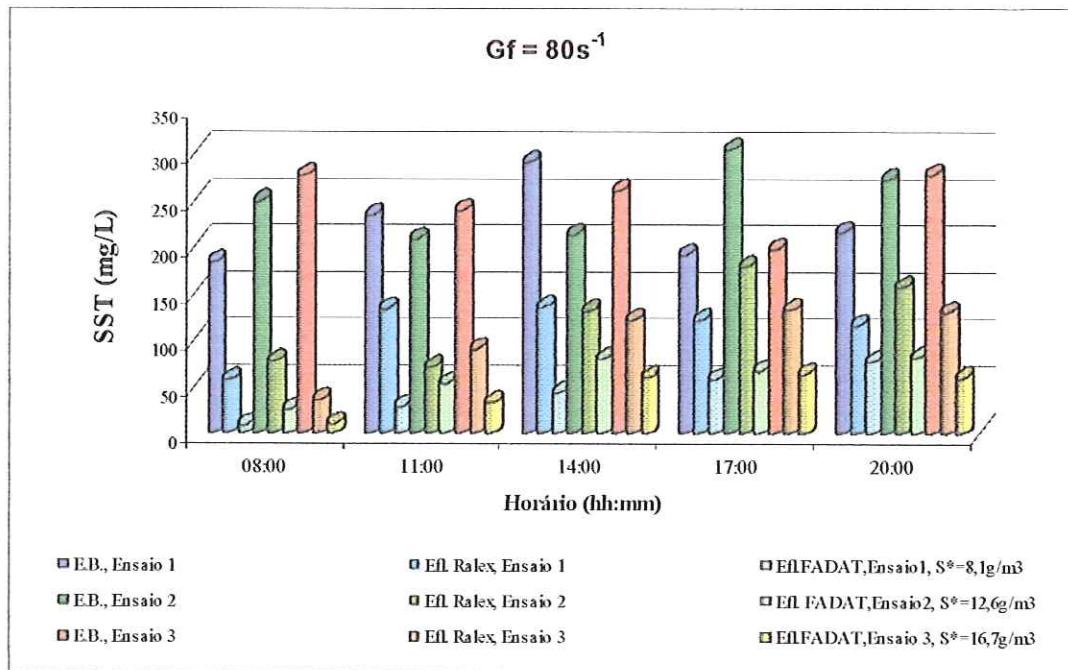


GRÁFICO 5.14 - SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20\text{ min.}$ ;  $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ;  $TAS = 21\text{ m/h}$ ;  $DCF = 50\text{ mg/L}$ ;  $G_f = 80\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

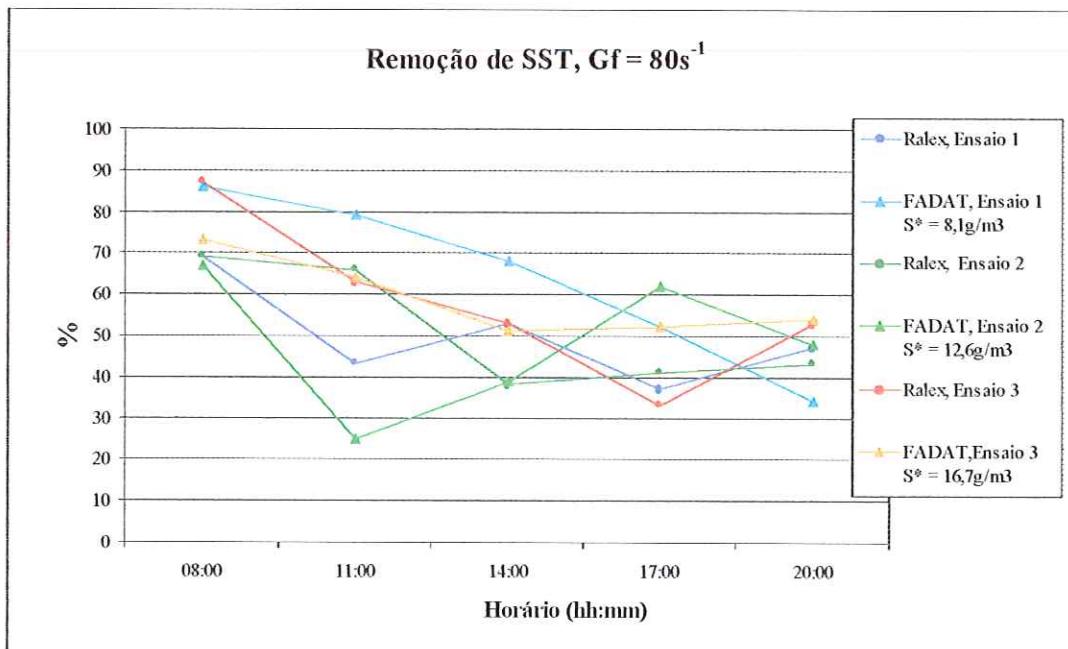


GRÁFICO 5.15 - Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20\text{ min.}$ ;  $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ;  $TAS = 21\text{ m/h}$ ;  $DCF = 50\text{ mg/L}$ ;  $G_f = 80\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

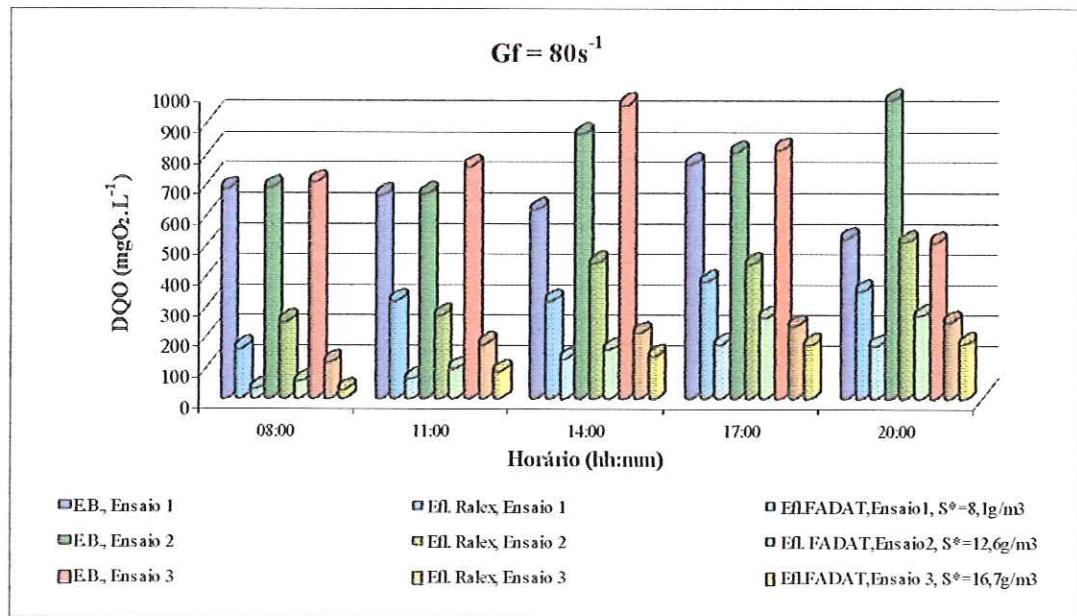


GRÁFICO 5.16 - Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

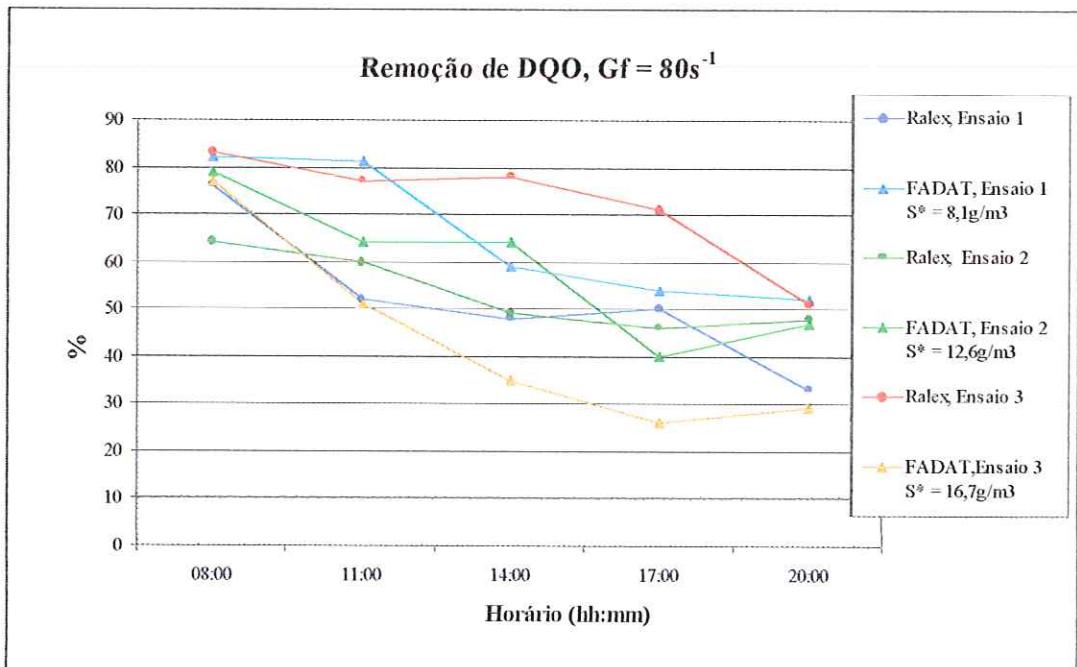
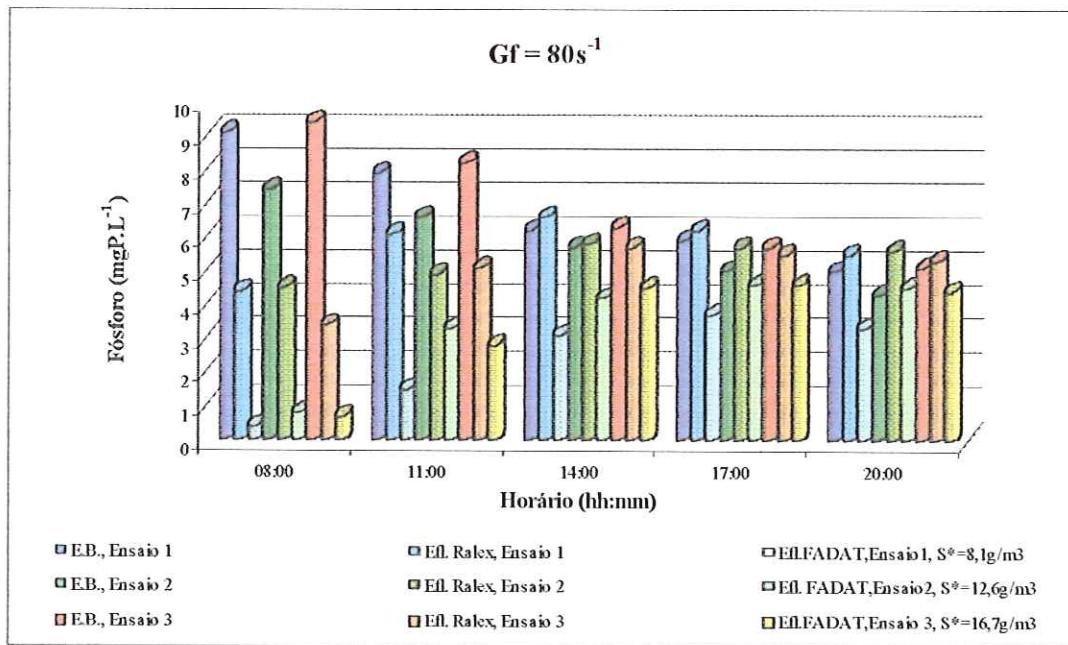
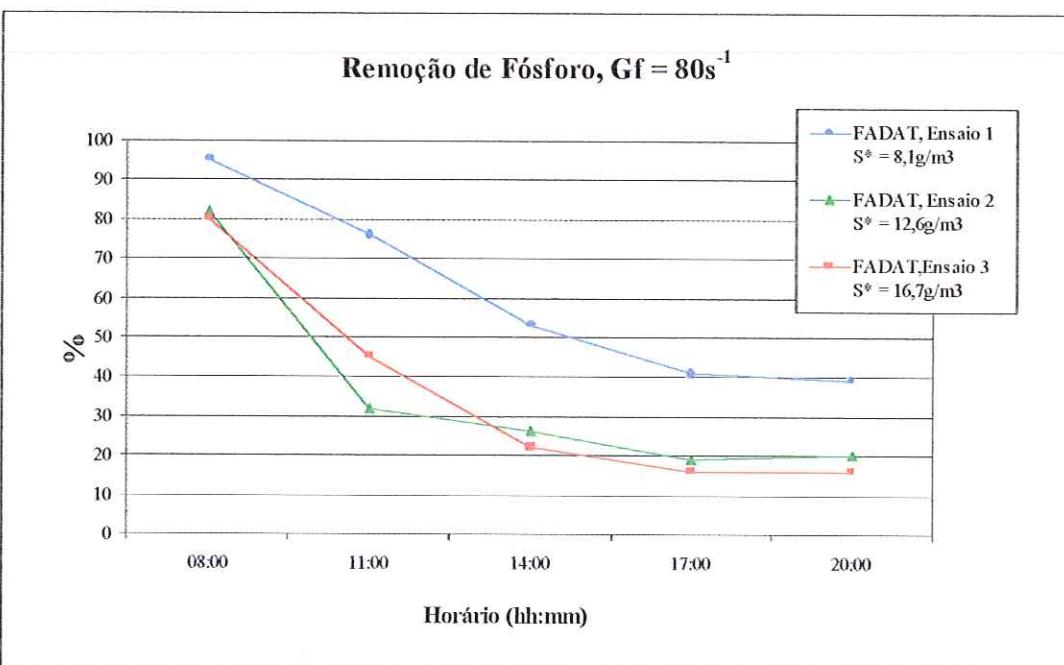


GRÁFICO 5.17 - Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.



**GRÁFICO 5.18 -** Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.



**GRÁFICO 5.19 -** Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

TABELA 3.2 - Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio:  $T_f = 20$  min.;  $P_{sat} = 450$  kPa;  $TAS = 21$  m/h;  $DCF = 50$  mg/L;  $G_f = 80$  s<sup>-1</sup>;  $S^* = 8,1$  g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 3)

	$G_f = 80$ s <sup>-1</sup>											
	Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> .l <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Média ao longo das 12 h (EB)	296	281	290	223	250	251	650	799	749	7	6	7
Média ao longo das 12 h (Efl. Ralex)	156	161	75	113	123	102	306	382	198	6	5	5
Média ao longo das 12h(Efl. FADAT)	42	54	42	43	61	45	113	168	120	2	3	3

Tempo (h)	Sistema	Eficiência de Remoção %											
		Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> .l <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)		
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
08:00	Ralex	72	73	87	69	69	87	76	64	83	51	39	65
	FADAT	95	90	86	86	67	73	82	79	77	92	82	80
	Ralex + FADAT	99	97	98	96	90	97	96	92	96	96	89	93
11:00	Ralex	56	63	80	43	66	63	52	60	77	23	26	37
	FADAT	89	59	53	79	25	64	81	64	51	76	32	45
	Ralex + FADAT	95	85	90	88	75	86	91	85	89	81	50	66
14:00	Ralex	39	34	75	53	38	53	48	49	78	-6	-1	9
	FADAT	76	69	40	68	39	51	59	64	35	53	26	22
	Ralex + FADAT	85	80	85	85	62	77	79	82	86	50	26	29
17:00	Ralex	45	27	69	37	41	33	50	46	71	-5	-13	3
	FADAT	64	65	36	52	62	52	54	40	26	41	19	16
	Ralex + FADAT	80	74	80	70	78	68	77	67	79	38	9	18
20:00	Ralex	21	8	55	47	43	53	33	48	51	-10	-31	-2
	FADAT	58	61	31	34	48	54	52	47	29	39	20	16
	Ralex + FADAT	67	64	69	64	70	79	67	72	65	33	-5	14
Média ao longo das 12 h (Ralex)		47	41	73	50	52	58	52	53	72	11	4	22
Média ao longo das 12 h (FADAT)		76	69	49	64	48	59	66	59	43	60	36	36
Média ao longo das 12h(Ralex+FADAT)		85	80	84	81	75	81	82	80	83	60	34	44

### 5.4.1.3 Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo, utilizando DCF de 50 mg/L, Gf de 100 s<sup>-1</sup>.

Os resultados dos ensaios em que foi investigado o gradiente médio de velocidade de flocação de 100 s<sup>-1</sup>, para tempo de flocação (Tf) de 20 min., taxa de aplicação superficial (21 m/h) e dosagem de cloreto férrico (DCF) de 50 mg/L mantidos fixos, variando-se os valores de quantidades de ar para a flotação de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 1; 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 2 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 3, são apresentados na Tabela 3.3.

Nos três ensaios realizados nessa fase da pesquisa tanto o esgoto bruto quanto o efluente do reator anaeróbio Ralex apresentaram características fisico-químicas similares, com pequenas variações nos valores médios de turbidez, SST, DQO e fósforo de um ensaio para outro ao longo de 12 h de ensaio.

Verifica-se através da Tabela 3.3 e dos Gráficos 5.20 a 5.27, que a utilização de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente para a flotação, proporcionou a melhor eficiência média de remoção de turbidez para o sistema FADAT (83%), com residual variando de 3,57 a 41,4 uT. Quanto à remoção de SST, nota-se que embora o fornecimento de 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente tenha proporcionado a maior média de remoção (68% e residual variando de 10 a 85 mg/L de SST) na unidade FADAT, o emprego de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente forneceu eficiência bastante próxima (66% de remoção, com residual entre 9 e 53 mg/L de SST). No que se refere à remoção de DQO, verifica-se que, utilizando-se também 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente, o sistema FADAT apresentou a melhor eficiência média de remoção (76%) com DQO residual entre 15 a 104 mgO<sub>2</sub>/L. Utilizando-se 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente, obteve-se a maior eficiência média de remoção de fósforo na unidade FADAT (47%, com P residual entre 1,5 e 4,0 mgP/L).

As características fisico-químicas do efluente da unidade piloto FADAT variaram ao longo do dia. As concentrações mínimas de turbidez, SST, DQO e fósforo eram verificadas sempre na primeira coleta (8h), e aumentavam gradativamente atingindo valores máximos entre as 14 e 20 h, quando começavam a diminuir. O efluente de melhor qualidade observado na unidade FADAT foi proporcionado pelo fornecimento de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

Em relação à eficiência global do sistema Ralex–FADAT, nota-se que o fornecimento de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente proporcionou o melhor desempenho do sistema, com as seguintes remoções médias: 88% de turbidez (com residual médio de 28uT), 78% de SST (com residual médio de 37mg/L de SST), 88% de DQO (com residual médio de 71 mgO<sub>2</sub>/L) e 56% de fósforo (com residual médio de 3 mgP/L).

De acordo com os resultados obtidos, dentre os valores de gradiente médio de velocidade de flocação (Gf) estudados, o de 80 s<sup>-1</sup> e 100 s<sup>-1</sup> forneceram os melhores resultados referente a remoção de turbidez, SST, DQO e fósforo.

Nota-se que o fornecimento de maior quantidade de ar não proporcionou aumento significativo na eficiência do processo e que, no geral, 8,1g de ar/m<sup>3</sup> de efluente apresentou as melhores eficiências médias de remoção no sistema FADAT operado com TAS de 21m/h, dosagem de cloreto férrico de 50mg/L e gradiente médio de velocidade de flocação variado.

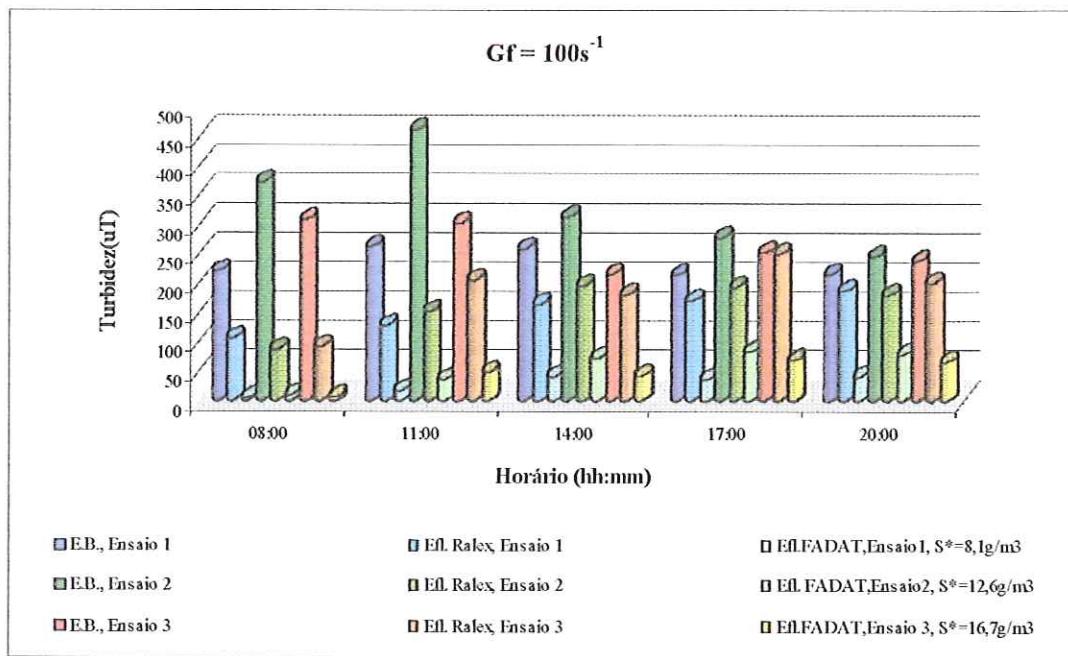


GRÁFICO 5.20 - Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

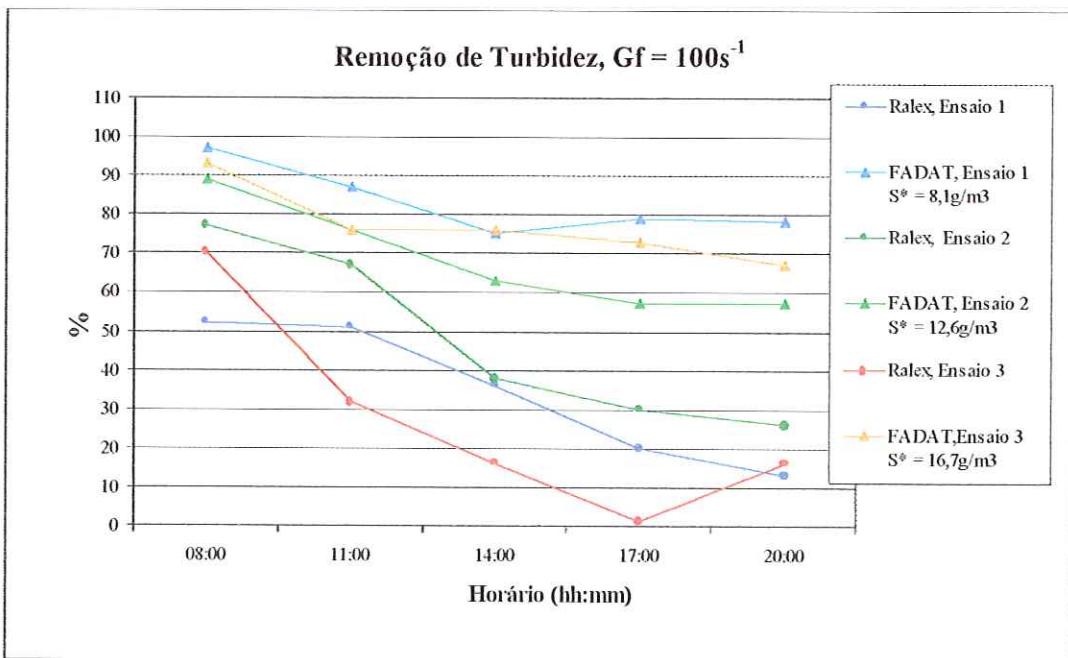


GRÁFICO 5.21 - Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

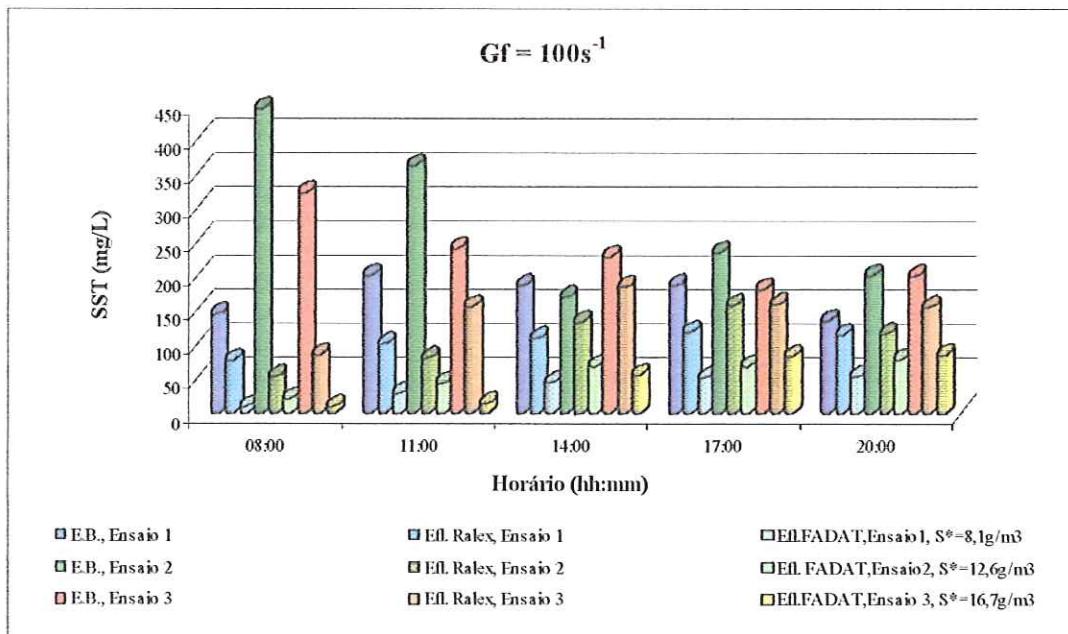


GRÁFICO 5.22 - SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente..

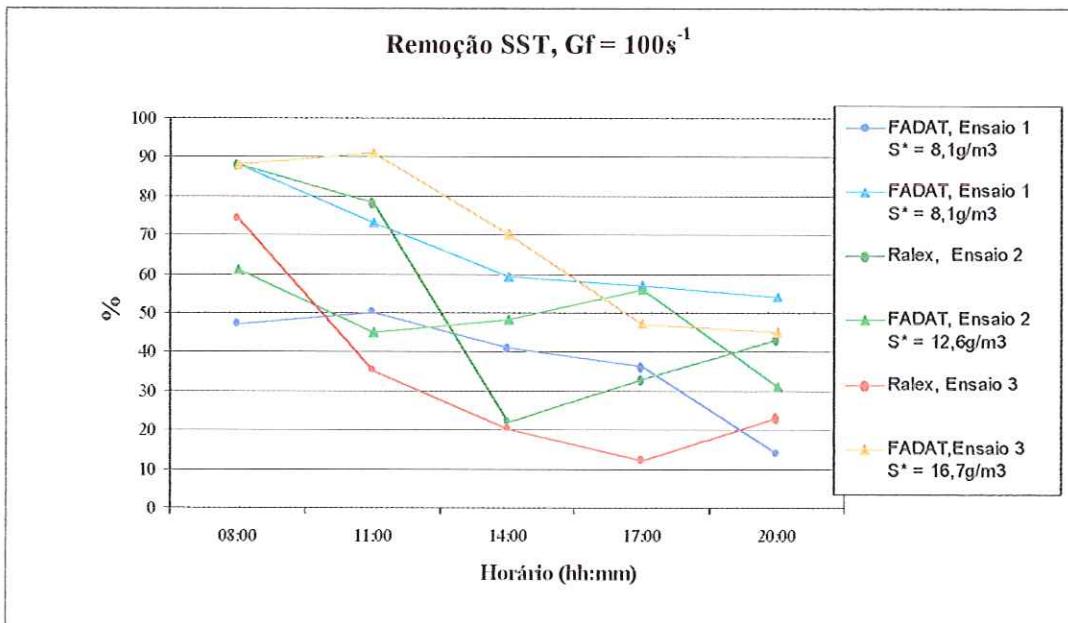


GRÁFICO 5.23 - Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

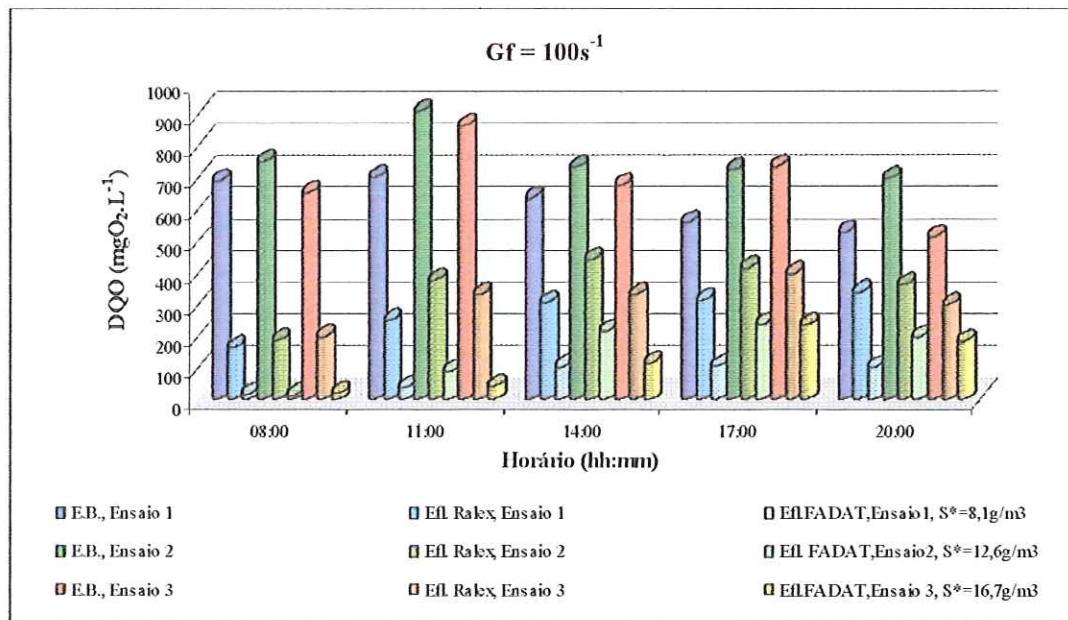


GRÁFICO 5.24 - Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20\text{ min.}$ ;  $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ;  $TAS = 21\text{ m/h}$ ;  $DCF = 50\text{ mg/L}$ ;  $G_f = 100\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6 \text{ e } 16,7\text{ g/m}^3$  de efluente.

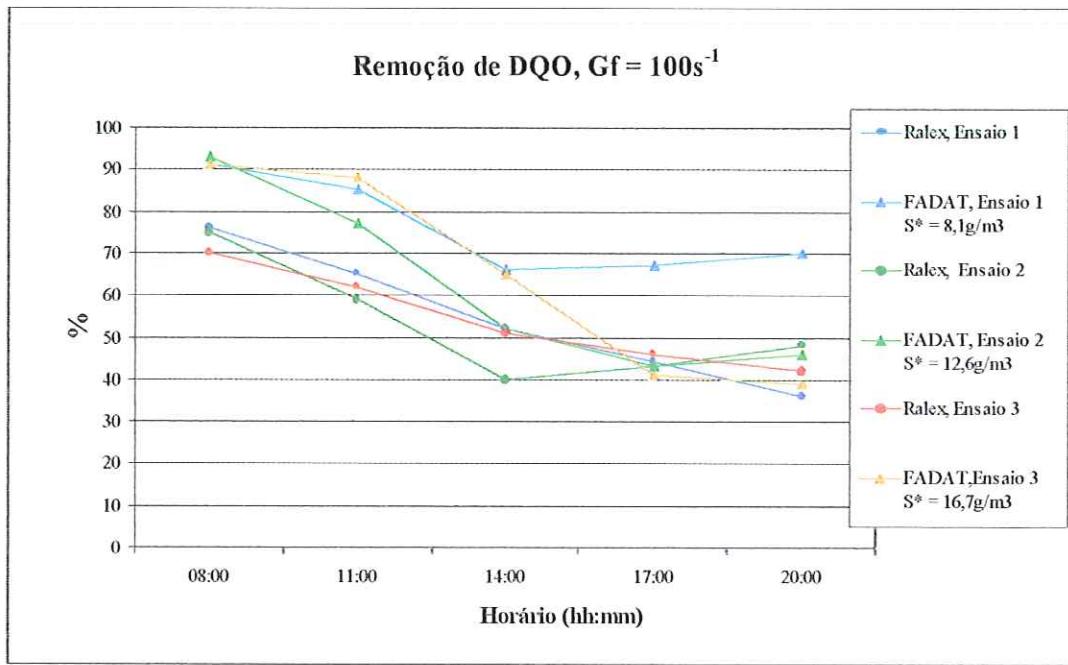


GRÁFICO 5.25 - Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20\text{ min.}$ ;  $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ;  $TAS = 21\text{ m/h}$ ;  $DCF = 50\text{ mg/L}$ ;  $G_f = 100\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6 \text{ e } 16,7\text{ g/m}^3$  de efluente.

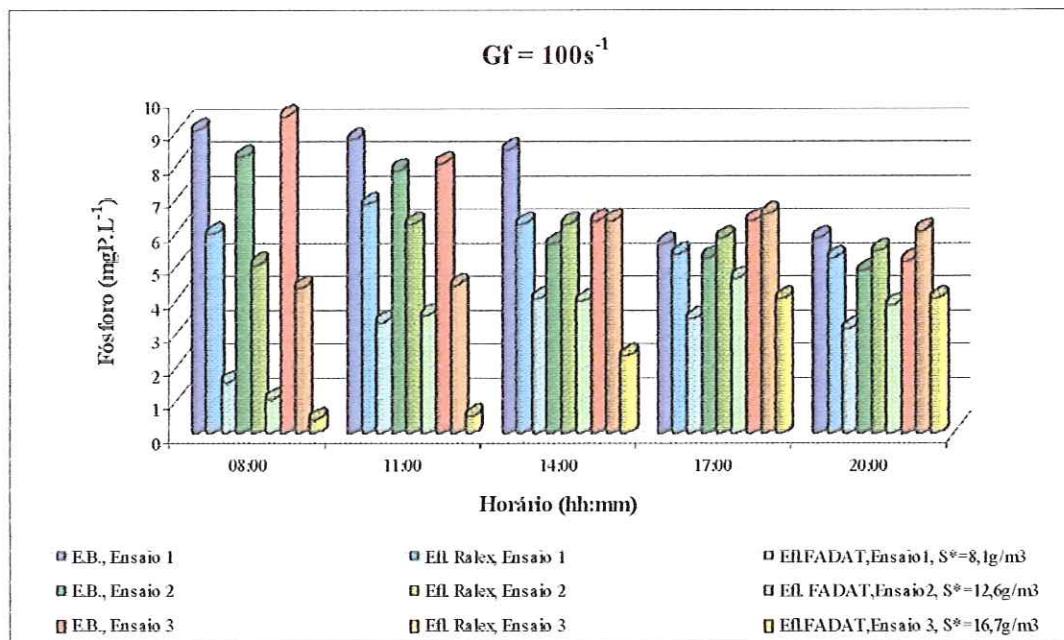


GRÁFICO 5.26 - Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20\text{ min.}$ ;  $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ;  $TAS = 21\text{ m/h}$ ;  $DCF = 50\text{ mg/L}$ ;  $Gf = 100\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

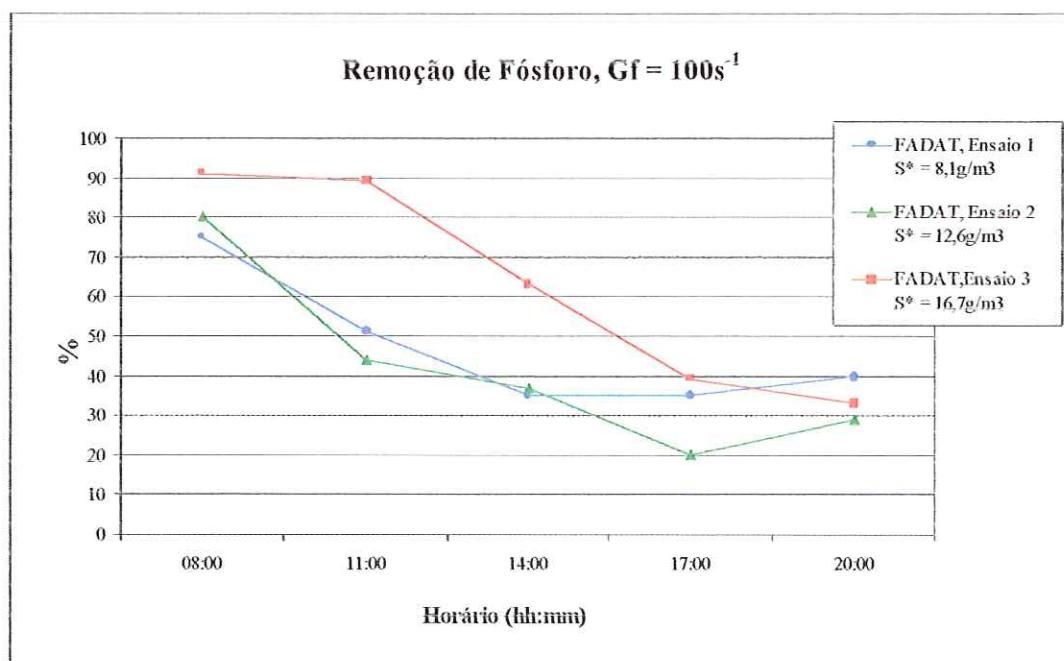


GRÁFICO 5.27 - Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex. Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20\text{ min.}$ ;  $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ;  $TAS = 21\text{ m/h}$ ;  $DCF = 50\text{ mg/L}$ ;  $Gf = 100\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

TABELA 3.3 - Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio:  $T_f = 20$  min.;  $P_{sat} = 450$  kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 50 mg/L;  $G_f = 100 \text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1\text{g de ar/m}^3$  de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 3)

$G_f = 100 \text{ s}^{-1}$												
Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO $\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$			Fósforo (mgP/L)			
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Média ao longo das 12 h (EB)	234	335	264	170	282	235	622	762	687	7	6	7
Média ao longo das 12 h (Efl. Ralex)	152	162	186	104	108	148	273	355	310	6	6	6
Média ao longo das 12h(Efl. FADAT)	28	56	47	37	56	50	71	149	118	3	3	4

Eficiência de Remoção %													
Tempo (h)	Sistema	Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO $\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$			Fósforo (mgP/L)		
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
08:00	Ralex	52	77	70	47	88	74	76	75	70	35	39	56
	FADAT	97	89	93	88	61	88	91	93	91	75	80	88
	Ralex + FADAT	98	97	98	94	95	97	98	98	97	83	88	95
11:00	Ralex	51	67	32	50	78	35	65	59	62	22	21	15
	FADAT	87	76	76	73	45	91	85	77	88	51	44	52
	Ralex + FADAT	94	92	84	86	88	94	95	90	95	62	56	59
14:00	Ralex	36	38	16	41	22	20	52	40	51	26	-9	-27
	FADAT	75	63	76	59	48	70	66	52	65	35	37	29
	Ralex + FADAT	84	77	80	76	60	76	84	71	83	52	31	10
17:00	Ralex	20	30	1	36	33	12	44	43	46	5	-11	8
	FADAT	79	57	73	57	56	47	67	43	41	35	20	13
	Ralex + FADAT	83	70	73	73	71	54	81	67	68	39	11	20
20:00	Ralex	13	26	16	15	43	23	36	48	42	11	-12	-15
	FADAT	78	57	67	54	31	45	70	46	39	40	29	24
	Ralex + FADAT	81	68	72	61	61	58	81	72	64	46	20	13
Média ao longo das 12 h (Ralex)		34	48	27	38	53	33	55	53	54	20	5	7
Média ao longo das 12 h (FADAT)		83	68	77	66	48	68	76	62	65	47	42	41
Média ao longo das 12h(Ralex+FADAT)		88	81	81	78	75	76	88	80	82	56	41	39

#### **5.4.1.4 Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo, utilizando DCF de 70 mg/L, Gf de 80 s<sup>-1</sup>.**

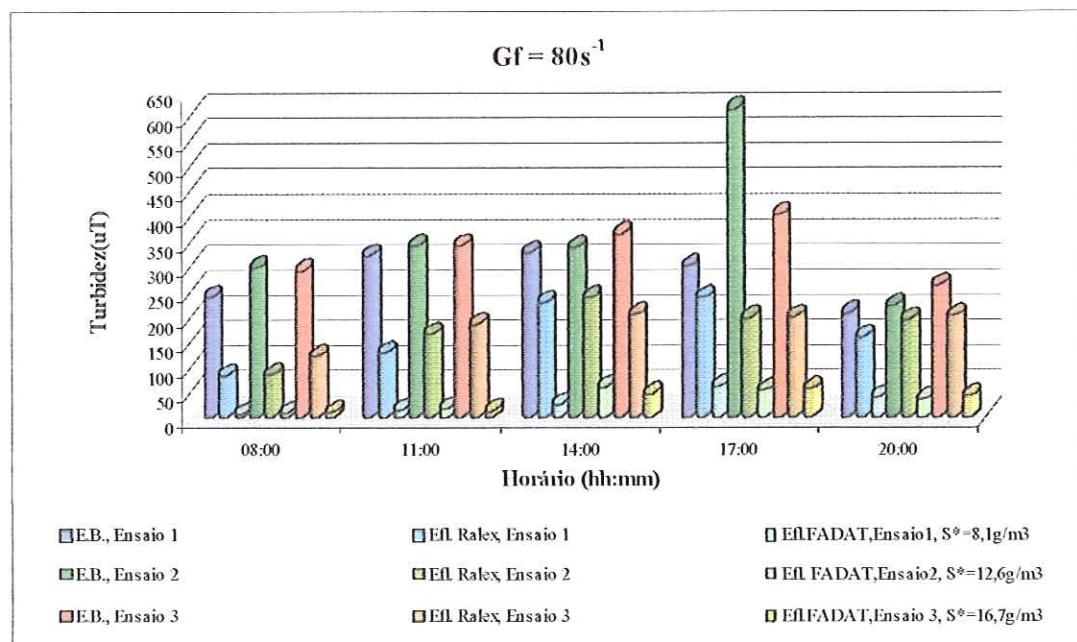
A Tabela 3.4 apresenta os resultados obtidos com o emprego de dosagem de cloreto férrico (DCF) de 70 mg/L na unidade piloto FADAT. Foram mantidas fixas as seguintes condições: tempo de flocação (Tf) de 20 min., taxa de aplicação superficial (21 m/h), dosagem de cloreto férrico (DCF) de 70 mg/L e gradiente médio de velocidade de flocação de 80 s<sup>-1</sup>. Variaram-se os seguintes valores de quantidade de ar para a flotação: 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> efluente(ensaio 3).

As características fisico-químicas do esgoto bruto apresentaram variações nos três ensaios realizados com TAS de 21 m/h, DCF de 70 mg/L e Gf de 80 s<sup>-1</sup>, sendo que no ensaio 1 os valores de turbidez, SST, DQO e fósforo foram mais baixos que os valores observados nos ensaios 2 e 3, nos quais a média final dos parâmetros analisados foram mais próximas. O efluente do reator anaeróbio apresentou ao longo das 12 h, qualidade semelhante nos três ensaios realizados, fornecendo concentrações médias próximas. Tal comportamento do reator anaeróbio propicia maior facilidade na comparação dos subseqüentes tratamento fisico-químico por flotação.

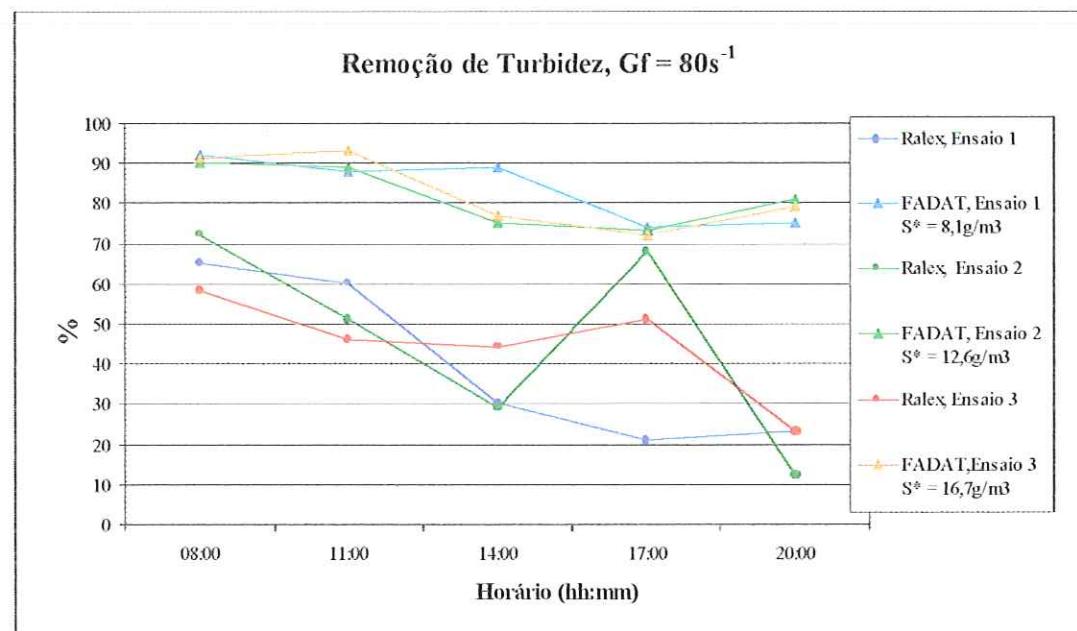
Na análise da Tabela 3.4 e dos Gráficos 5.28 a 5.35, observa-se que, a eficiência média de remoção de turbidez proporcionada por 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente foi a maior na unidade FADAT (84%, com residuais de 6,3 a 62 uT). A maior eficiência média de remoção de SST na FADAT foi observada utilizando-se 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (67% de remoção, com residual entre 8 e 80 mg/L de SST). Quanto à eficiência média de remoção de DQO na unidade piloto FADAT, observa-se que os resultados foram muito semelhantes e extremamente próximos, para os três os valores de quantidade de ar fornecidos para a flotação: (8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente). Os percentuais de remoção foram respectivamente: 73% (residual entre 20 e 156 mgO<sub>2</sub>/L), 73% (residual entre 22 e 140 mgO<sub>2</sub>/L) e 72% (residual de 35 a 123 mgO<sub>2</sub>/L). No que concerne à remoção de fósforo, o ensaio realizado com aplicação de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente forneceu a melhor eficiência média de remoção na FADAT (75%), com residual entre 0,5 e 1,9 mgP/L.

A unidade piloto FADAT forneceu ao final de 12 h de operação, para os três ensaios realizados, concentrações médias de turbidez, SST, DQO e fósforo bastante próximas, uma vez que a qualidade do efluente do reator Ralex, conforme mencionado, também apresentou características semelhantes. A menor concentração dos parâmetros analisados era obtida sempre às 8h atingindo valor máximo entre 14 e 17 h, voltando a diminuir em seguida.

Considerando a eficiência global do sistema de tratamento Ralex-FADAT observa-se que os três valores de quantidade de ar fornecido para a flotação (8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente) apresentaram eficiências de remoção bastante semelhantes e que o fornecimento de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente proporcionou as seguintes remoções médias ao longo de 12h de ensaio: 89% de turbidez (residual médio de 30uT), 74% de SST (residual médio de 47 mg/L de SST), 84% de DQO (residual médio de 85 mgO<sub>2</sub>/L) e 74% de fósforo (residual médio de 1mgP/L).



**GRÁFICO 5.28 - Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.**



**GRÁFICO 5.29 - Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.**

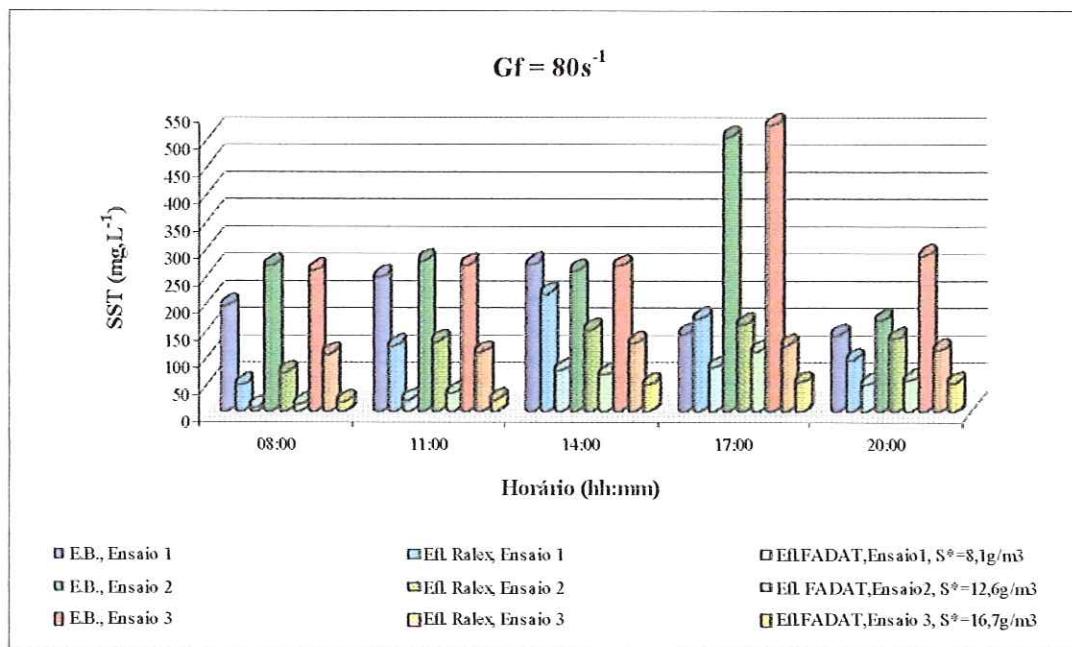


GRÁFICO 5.30 - SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20\text{ min.}$ ;  $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ;  $TAS = 21\text{ m/h}$ ;  $DCF = 70\text{ mg/L}$ ;  $Gf = 80\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

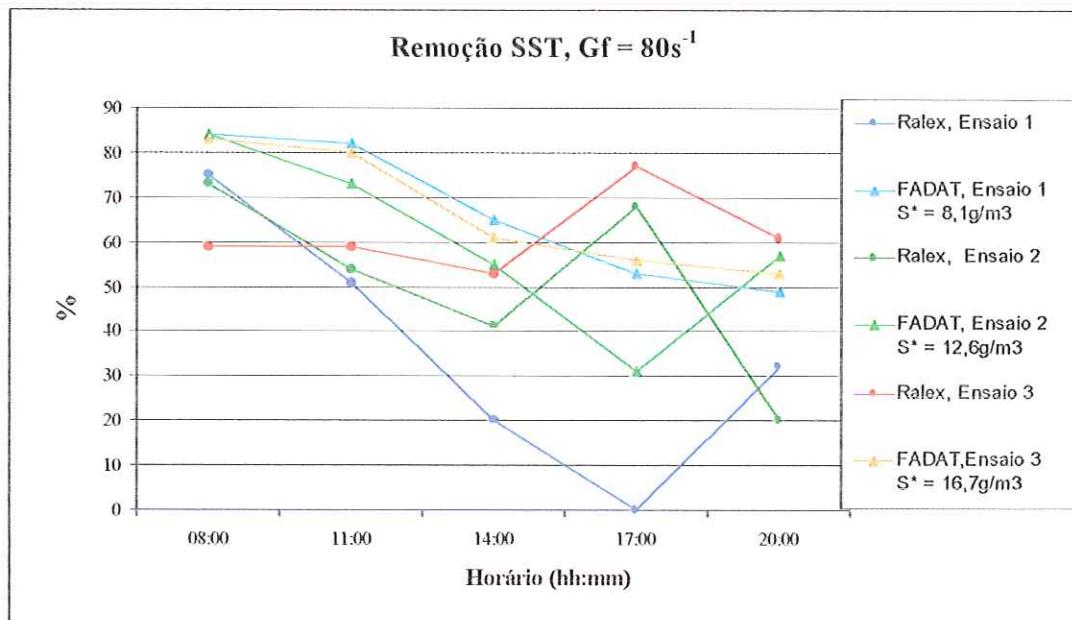


GRÁFICO 5.31 - Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20\text{ min.}$ ;  $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ;  $TAS = 21\text{ m/h}$ ;  $DCF = 50\text{ mg/L}$ ;  $Gf = 80\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

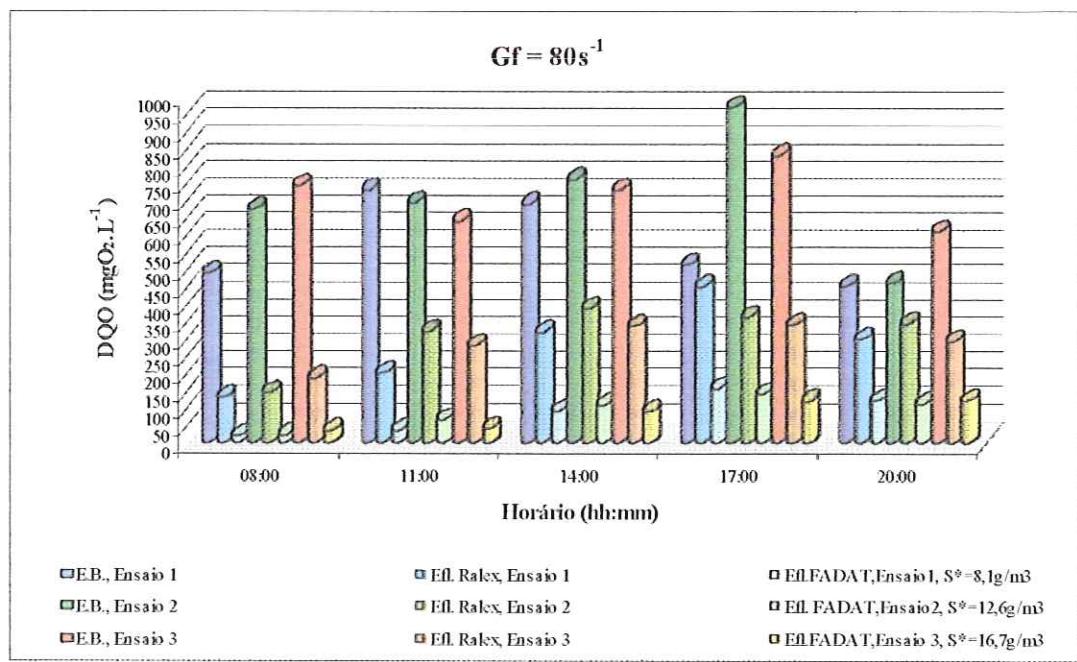


GRÁFICO 5.32 - Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

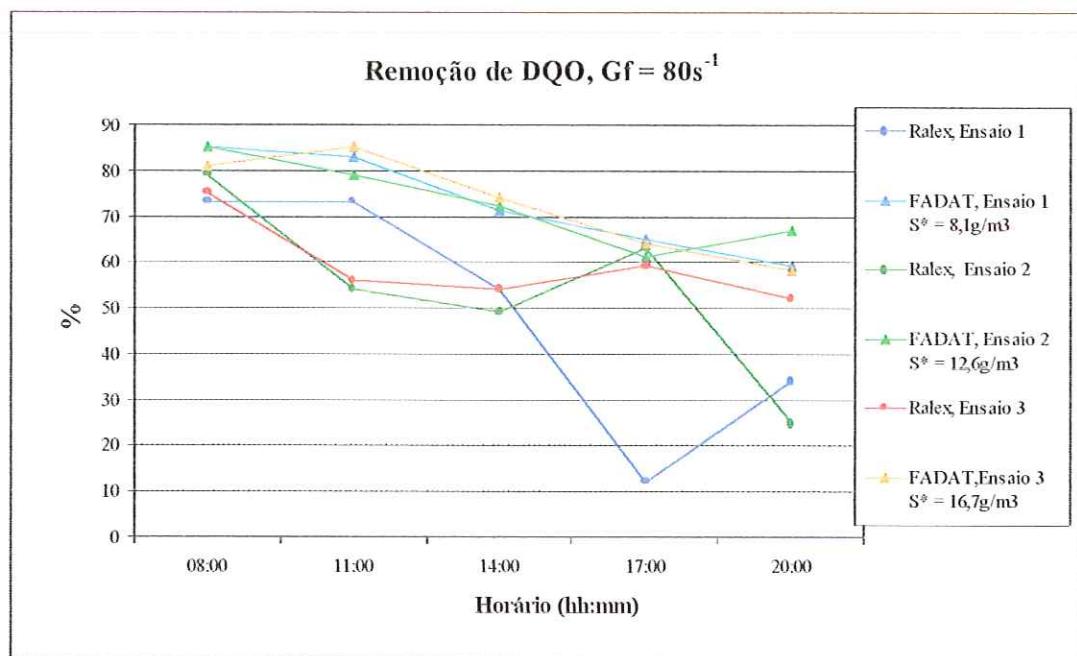
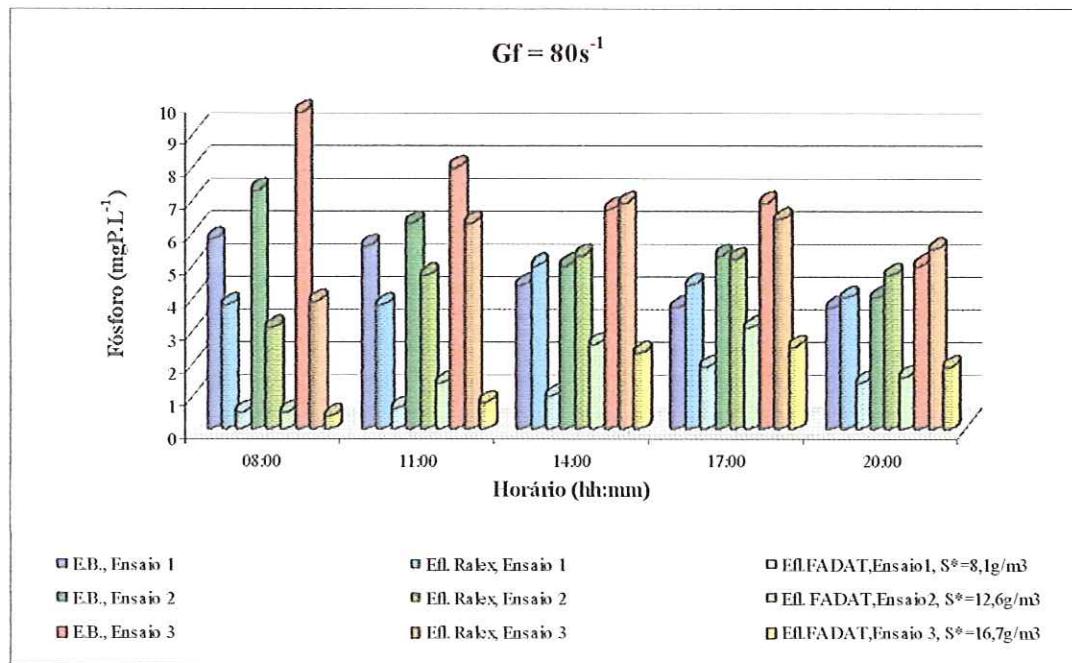
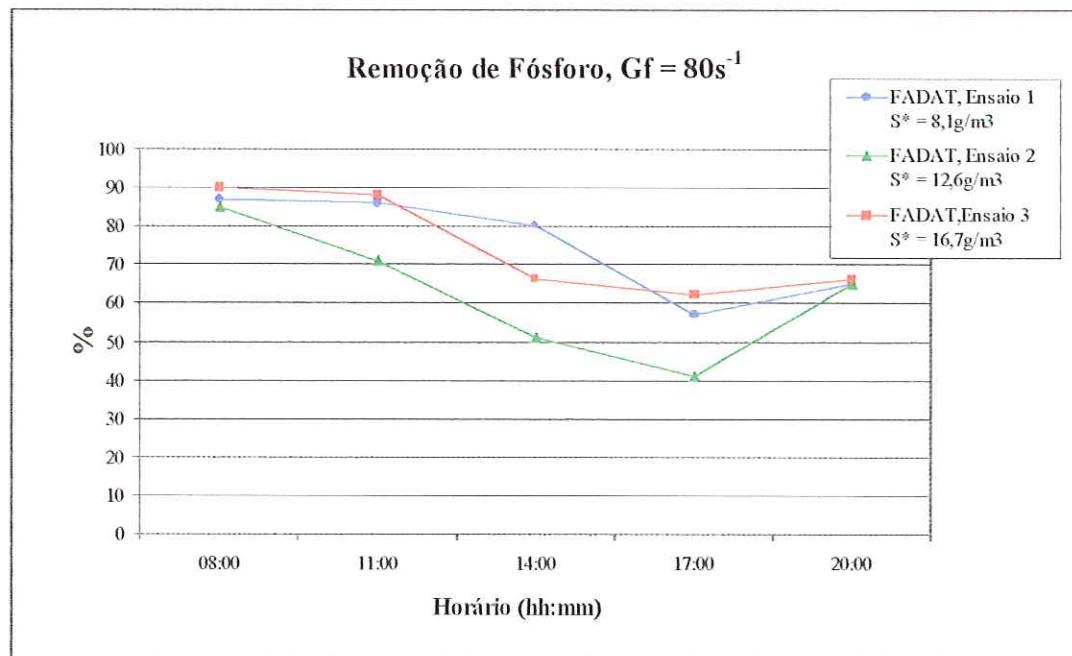


GRÁFICO 5.33 - Remoção de DQO no reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.



**GRÁFICO 5.34 - Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.**



**GRÁFICO 5.35 - Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.**

TABELA 3.4 - Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio:  $T_f = 20$  min.;  $P_{sat} = 450$  kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L;  $G_f = 80$  s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 3)

	$G_f = 80$ s <sup>-1</sup>											
	Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Média ao longo das 12 h (EB)	279	362	332	199	295	322	575	711	710	5	6	7
Média ao longo das 12 h (Efl. Ralex)	167	175	182	130	129	115	280	312	287	4	5	6
Média ao longo das 12h(Efl. FADAT)	30	35	34	47	56	39	85	90	82	1	2	2

Tempo (h)	Sistema	Eficiência de Remoção %											
		Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)		
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
08:00	Ralex	65	72	58	75	73	59	73	79	75	34	57	60
	FADAT	92	90	91	84	84	83	85	85	81	87	85	90
	Ralex + FADAT	97	97	96	96	96	93	96	97	95	92	93	96
11:00	Ralex	60	51	46	51	54	59	73	54	56	32	26	22
	FADAT	88	89	93	82	73	80	83	79	85	86	71	88
	Ralex + FADAT	95	95	96	91	88	92	95	90	94	90	78	90
14:00	Ralex	30	29	44	20	41	53	54	49	54	-12	-6	-3
	FADAT	89	75	77	65	55	61	71	72	74	80	51	66
	Ralex + FADAT	92	82	87	72	74	82	87	86	88	77	48	65
17:00	Ralex	21	68	51	-19	68	77	12	63	59	-17	1	7
	FADAT	74	73	72	53	31	56	65	61	64	57	41	62
	Ralex + FADAT	79	91	86	44	78	90	70	86	85	49	41	64
20:00	Ralex	23	13	23	32	20	61	34	25	52	-8	-18	-10
	FADAT	75	81	79	49	57	53	59	67	58	65	65	66
	Ralex + FADAT	80	83	84	65	66	82	73	75	80	63	59	62
Média ao longo das 12 h (Ralex)		40	47	44	32	51	62	49	54	59	6	12	15
Média ao longo das 12 h (FADAT)		84	82	82	67	60	66	73	73	72	75	62	74
Média ao longo das 12h(Ralex+FADAT)		89	90	90	74	80	88	84	87	88	74	64	76

#### **5.4.1.5 Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo, utilizando DCF de 70 mg/L, Gf de 100 s<sup>-1</sup>.**

Na Tabela 3.5 são apresentados os resultados obtidos no ensaio referente ao emprego de 70 mg/L de cloreto férrico associado a gradiente médio de velocidade de flocação de 100 s<sup>-1</sup>. Para tempo de flocação (Tf) de 20 min. e taxa de aplicação superficial de 21 m/h, foram estudados valores de quantidade de ar fornecida para a flotação de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 1; 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 2 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 3.

As características físico-químicas do esgoto bruto apresentaram variações nos três ensaios realizados nessa etapa. O esgoto bruto e o efluente do reator anaeróbio Ralex caracterizados no ensaio 1, apresentaram ao final de 12 h de ensaio qualidade inferior aos efluentes caracterizados nos ensaios 2 e 3, com médias de turbidez, SST e DQO mais elevadas.

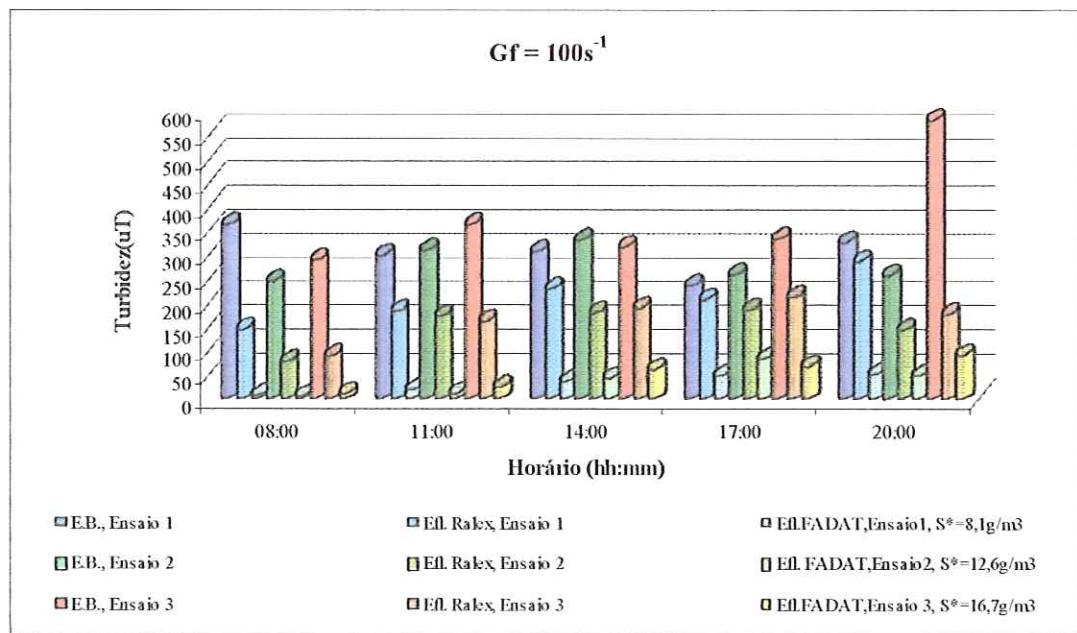
A análise dos resultados apresentados na Tabela 3.5 e nos Gráficos 5.36 a 5.43 mostra que, utilizando-se 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente obteve-se a maior média de remoção de turbidez na unidade FADAT (86%) com residuais entre 6,48 a 51,1 uT. A maior eficiência média de remoção de SST foi obtida com 8,1 e 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente na unidade FADAT (63%), com residuais entre 16 e 70mg/L e entre 13 e 60 mg/L de SST, respectivamente. Em relação à remoção de DQO, a quantidade de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente proporcionou a melhor eficiência média de remoção de DQO na unidade FADAT (72%, com residuais entre 12 a 235 mgO<sub>2</sub>/L). Quanto à eficiência média de remoção de fósforo, observa-se que os resultados das frações de recirculações estudadas foram bastante similares entre si, sendo que o valor de 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente forneceu a melhor média de remoção no sistema FADAT (65%, com residual entre 04 e 3.4 mgP/L).

A qualidade do efluente da unidade piloto FADAT apresentou variações ao longo de 12 h de operação e valores médios finais semelhantes nos três ensaios realizados. A maior eficiência de remoção dos parâmetros analisados foi obtida no ensaio 1 com aplicação de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente, embora o efluente do reator Ralex tenha apresentado na média, valores mais elevados de turbidez, SST, DQO, se comparados com os ensaios 2 e 3.

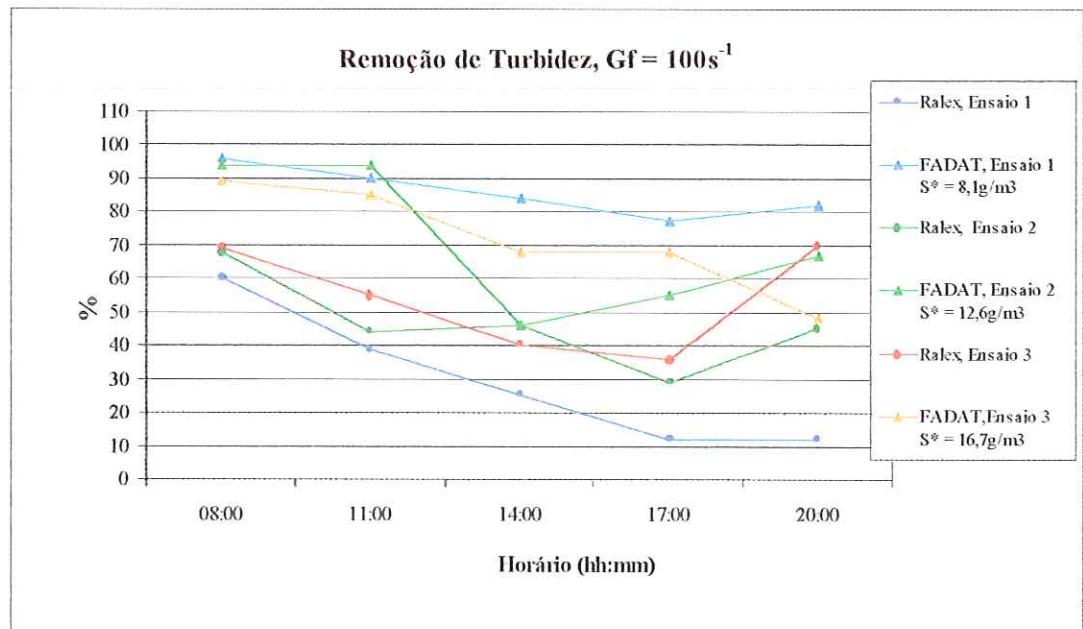
Considerando-se o sistema global de tratamento Ralex-FADAT nota-se que com aplicação de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente, o mesmo apresentou as seguintes eficiências médias de remoção ao longo de 12 h de operação: 89% de turbidez, 75% de SST, 81% de DDQ e 69% de fósforo. Nessa condição os residuais médios no efluente final foram: 32 uT de turbidez, 51 mg/L de SST, 109 mgO<sub>2</sub>/L de DQO e 2 mgP/L de fósforo.

Comparando-se os resultados obtidos com a utilização de TAS de 21m/h e DCF de 70 mg/L, os valores de gradiente médio de velocidade de flocação estudados ( $80\text{ s}^{-1}$  e  $100\text{ s}^{-1}$ ), apresentaram resultados muito semelhantes, sendo que o Gf de  $80\text{ s}^{-1}$  forneceu resultados ligeiramente superiores. Considerando-se a eficiência global do sistema Ralex-FADAT, observa-se que para a melhor condição de Gf e de quantidade de ar fornecida obteve-se as seguintes remoções: 90% de turbidez, 88% de DQO, 76% de fósforo e 88% de SST. É interessante observar também que para ambos os ensaios a remoção de DQO no sistema global foi superior a 80% para todos os valores de quantidade de ar testados.

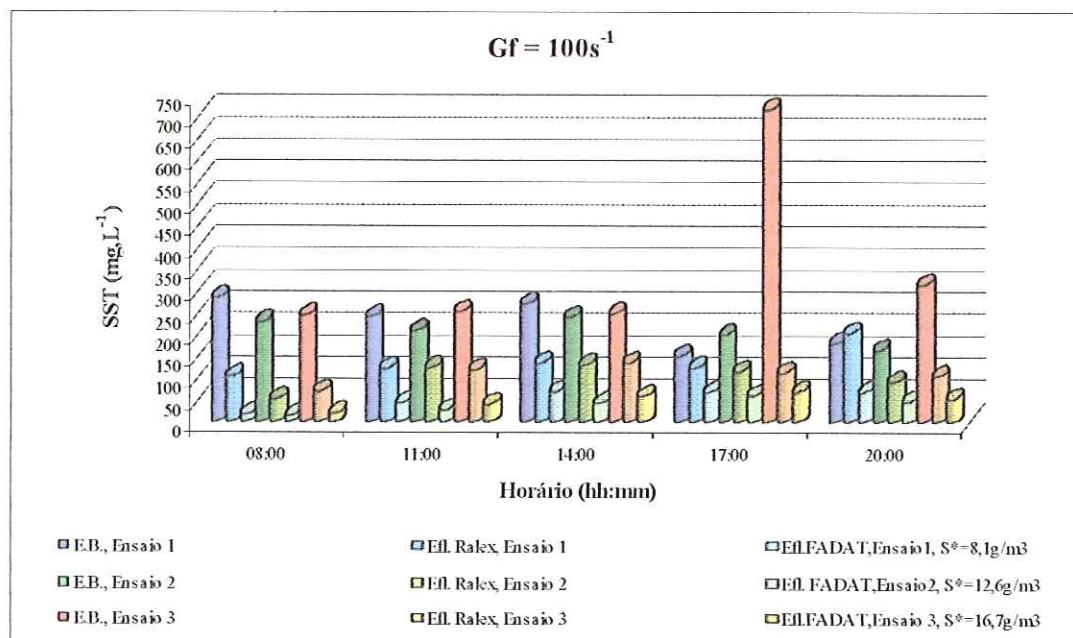
Nota-se, conforme já observado anteriormente, que o fornecimento de maior quantidade de ar para a flotação não proporcionou aumento significativo na eficiência do processo e que, no geral, 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente apresentou as melhores eficiências médias de remoção no sistema FADAT.



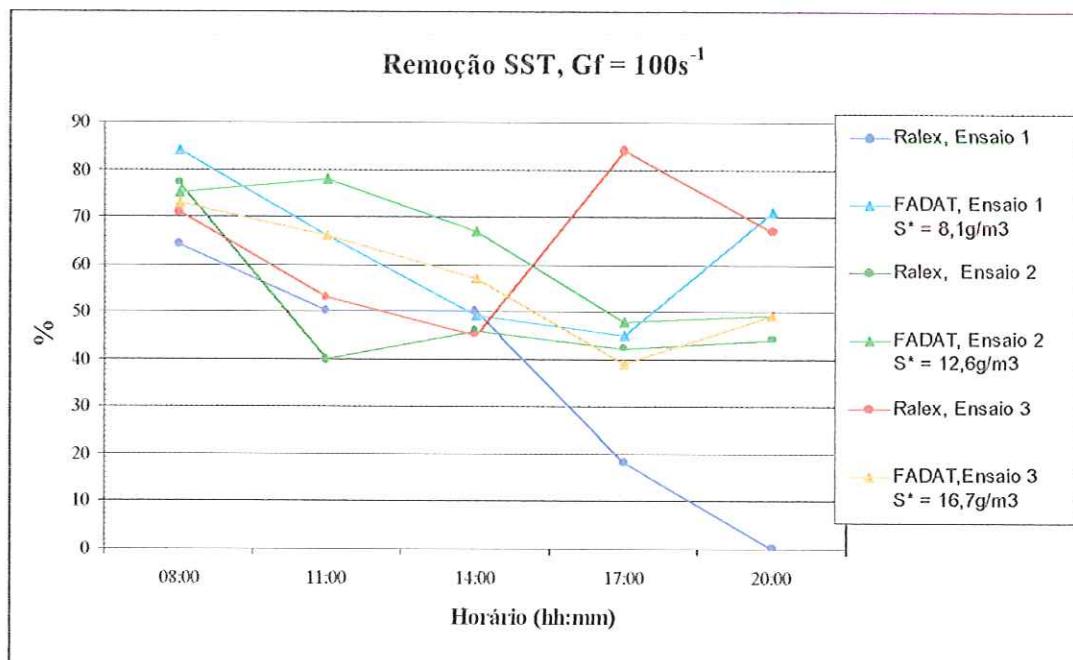
**GRÁFICO 5.36** - Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20$  min.;  $P_{sat} = 450$  kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L;  $G_f = 100 \text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7 \text{ g de ar/m}^3$  de efluente.



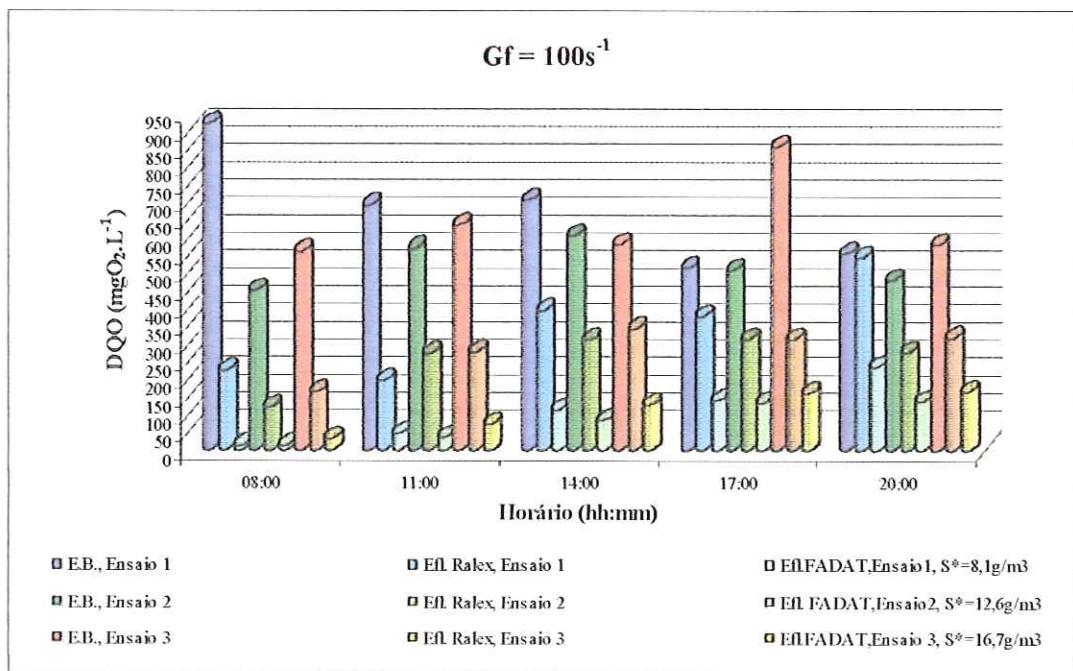
**GRÁFICO 5.37** - Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20$  min.;  $P_{sat} = 450$  kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L;  $G_f = 100 \text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7 \text{ g de ar/m}^3$  de efluente.



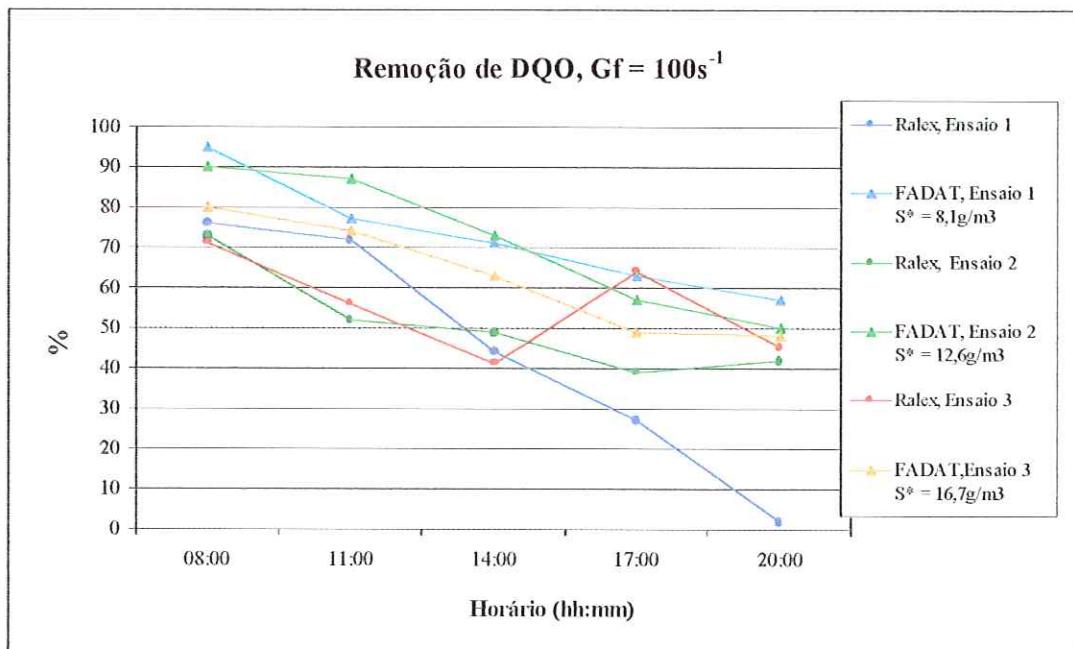
**GRÁFICO 5.38 -** SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.



**GRÁFICO 5.39 -** Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.



**GRÁFICO 5.40 - Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT).** Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.



**GRÁFICO 5.41 - Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT.** Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

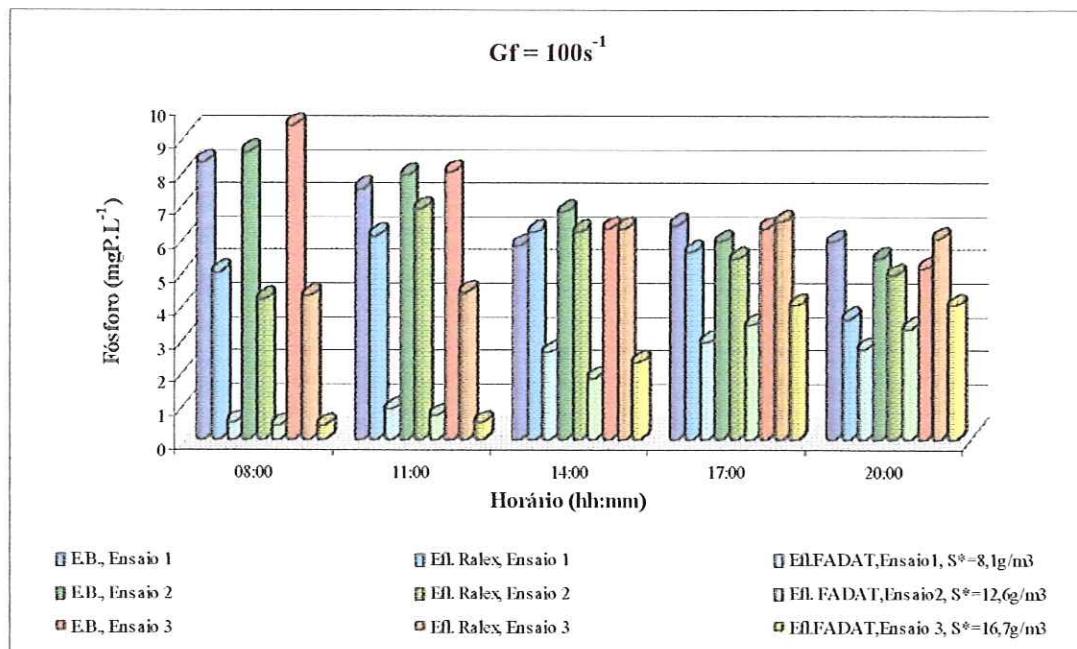


GRÁFICO 5.42 - Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20\text{ min.}$ ;  $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ;  $TAS = 21\text{ m/h}$ ;  $DCF = 70\text{ mg/L}$ ;  $Gf = 100\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

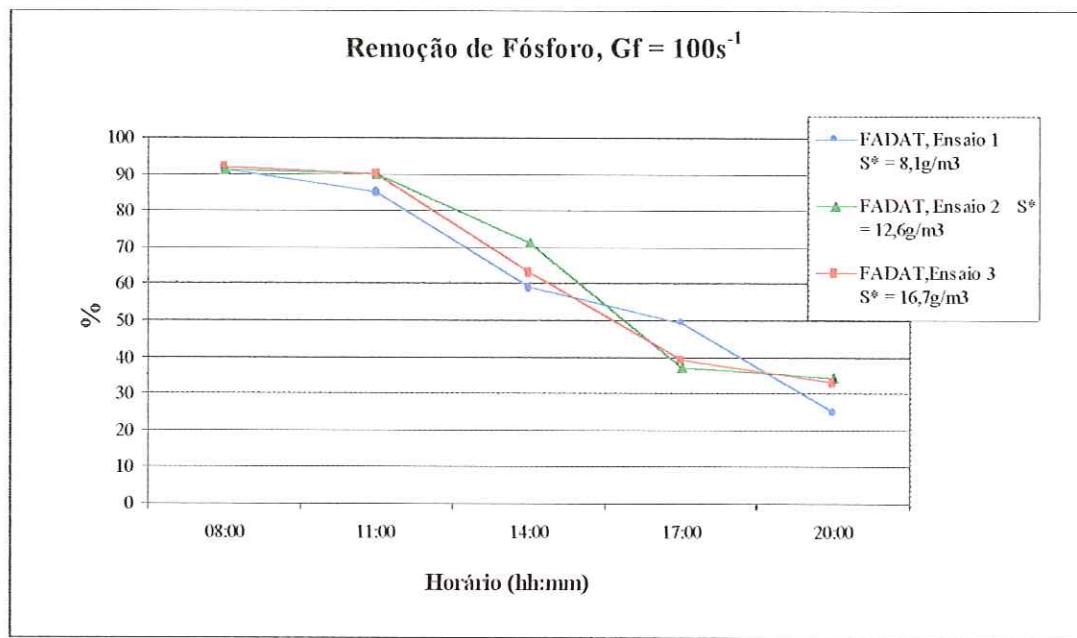


GRÁFICO 5.43 - Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex. Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20\text{ min.}$ ;  $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ;  $TAS = 21\text{ m/h}$ ;  $DCF = 70\text{ mg/L}$ ;  $Gf = 100\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

TABELA 3.5- Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 21 m/h; DCF = 70 mg/L; G<sub>f</sub> = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 3)

	Gf = 100 s <sup>-1</sup>											
	Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Média ao longo das 12 h (EB)	306	280	377	226	208	356	676	521	642	7	7	7
Média ao longo das 12 h (Efl. Ralex)	210	151	166	138	103	109	346	258	282	5	6	6
Média ao longo das 12h(Efl. FADAT)	32	38	51	51	38	48	109	80	111	2	2	2

Tempo (h)	Sistema	Eficiência de Remoção %											
		Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)		
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
08:00	Ralex	60	68	69	64	77	71	76	73	71	40	51	54
	FADAT	96	94	89	84	75	73	95	90	80	91	91	91
	Ralex + FADAT	98	98	97	94	94	92	99	97	94	94	95	96
11:00	Ralex	39	44	55	50	40	53	72	52	56	18	12	45
	FADAT	90	94	85	66	78	66	77	87	74	85	90	89
	Ralex + FADAT	94	97	93	83	87	84	93	94	89	88	92	94
14:00	Ralex	25	46	40	50	46	45	44	49	41	-7	9	-1
	FADAT	84	76	68	49	67	57	71	73	63	59	71	63
	Ralex + FADAT	88	87	81	74	82	77	84	86	78	56	74	63
17:00	Ralex	12	29	36	18	42	84	27	39	64	12	9	-3
	FADAT	77	55	68	45	48	39	63	57	49	49	37	39
	Ralex + FADAT	80	68	80	55	70	90	73	74	81	55	43	37
20:00	Ralex	12	45	70	-14	44	67	2	42	45	39	9	-18
	FADAT	82	67	48	71	49	49	57	50	48	25	34	33
	Ralex + FADAT	84	82	84	67	71	83	58	71	71	54	40	21
Média ao longo das 12 h (Ralex)		30	46	54	33	50	64	44	51	55	20	18	15
Média ao longo das 12 h (FADAT)		86	77	72	63	63	57	72	71	63	62	65	63
Média ao longo das 12h(Ralex+FADAT)		89	86	87	75	81	85	81	84	83	69	69	62

### 5.4.2 Resultados dos ensaios com taxa de aplicação superficial de 42m/h

As tabelas de 3.6 a 3.9 apresentam resultados referentes aos ensaios realizados com emprego de taxa de aplicação superficial igual a 42m/h. Foram testadas dosagens de cloreto férrico de 50mg/L e 70 mg/L, gradientes médios de velocidade de flocação de  $80\text{ s}^{-1}$  e  $100\text{ s}^{-1}$ , e quantidades de ar para a flotação de 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de esfluente.

Na figura 11 encontra-se apresentado um fluxograma ilustrativo dos ensaios realizados com aplicação de taxa de 42 m/h e tempo de flocação de 20 minutos na unidade FADAT.

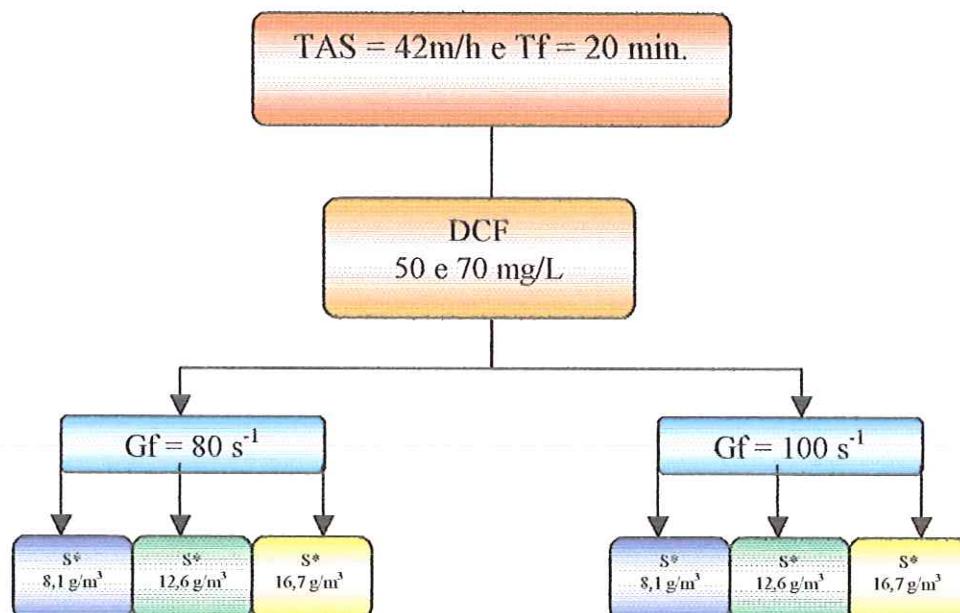


FIGURA 11 - Fluxograma dos ensaios realizados com a instalação piloto FADAT, utilizando taxa de aplicação superficial de 42m/h,  $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ., dosagens de cloreto férrico de 50mg/L e 70 mg/L, gradientes médios de velocidade de flocação de  $60\text{ s}^{-1}$ ,  $80\text{ s}^{-1}$  e  $100\text{ s}^{-1}$  Quantidade de ar fornecida para a flotação ( $S^*$ ): 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de esfluente.

#### **5.4.2.1 Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo, utilizando DCF de 50 mg/L, Gf de 80 s<sup>-1</sup>.**

A Tabela 3.6 apresenta os resultados obtidos com aplicação de 50 mg/L de cloreto férreo de na unidade piloto FADAT. Para tempo de flocação (Tf) de 20 min., taxa de aplicação superficial de 42 m/h e gradiente médio de velocidade de flocação de 80 s<sup>-1</sup>, mantidos fixos, foram estudados os seguintes valores de quantidades de ar para a flotação: 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 1; 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 2 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 3.

A qualidade do esgoto bruto apresentou variações nos três ensaios realizados, apesar de fornecer no final das 12 h de cada ensaio valores médios semelhantes das características físico-químicas analisadas. O reator Ralex apresentou efluente com menores variações de suas características, propiciando maior facilidade operacional do subsequente tratamento por flotação.

Através da análise da Tabela 3.6 e dos Gráficos 5.44 a 5.51, verifica-se que, em relação a turbidez, a eficiência média de remoção proporcionada por 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente foi a maior na unidade FADAT (68%, com residual entre 16 e 80,7 uT). No que concerne a remoção de sólidos suspensos (SST), verifica-se que a maior média de remoção foi alcançada com 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente, proporcionando na unidade FADAT remoção de 51%, com valores residuais na faixa de 22,5 a 80 mg/L de SST. Em relação à remoção de DQO na unidade FADAT, observa-se que o emprego de 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente forneceu a melhor média de eficiência de remoção, 58% com residual de 52 a 182 mgO<sub>2</sub>/L. Nota-se que a eficiência de remoção de fósforo na unidade FADAT também foi bastante semelhante para os valores de 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente estudados, sendo que a maior média de remoção (42%, com residual entre 0,9 e 3,9 mgP/L) foi obtido com 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

O comportamento da unidade piloto FADAT nos três ensaios realizados ao longo das 12 h de operação (8h às 20h) foi bastante semelhante, apesar da qualidade variável do efluente do reator Ralex. Dessa maneira, a unidade FADAT forneceu efluente final com menores variações dos parâmetros analisados, sendo observados

os seguintes intervalos de resíduais médios: 55 e 62 uT de turbidez, 56 a 68 mg/L de SST, 137 a 155 mgO<sub>2</sub>/L de DQO e 3 a 4 mgP/L.

No geral nota-se que o aumento da taxa de aplicação superficial de 21 m/h para 42m/h exigiu um ligeiro aumento na quantidade de ar fornecida para a flotação.

Em relação à eficiência global do sistema tratamento Ralex–FADAT os três valores fornecidos de quantidade de ar para a flotação proporcionaram resultados semelhantes. Foram obtidas para a melhor condição de S\*, as seguintes eficiências médias de remoção: 82% de turbidez, 73% de SST, 76% de DQO e 43% de fósforo.

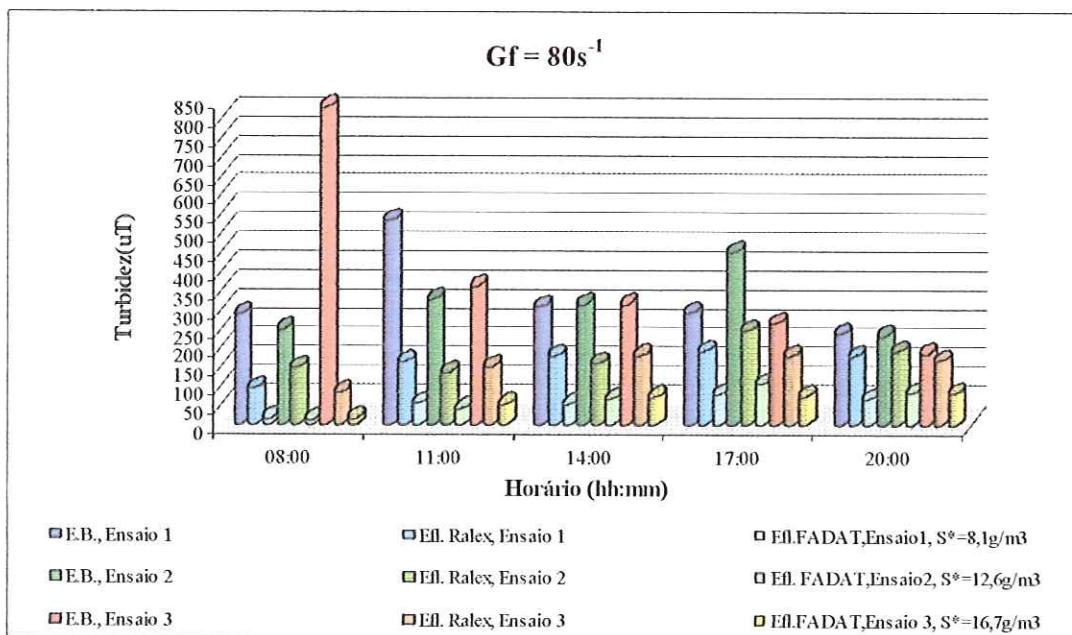


GRÁFICO 5.44 - Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

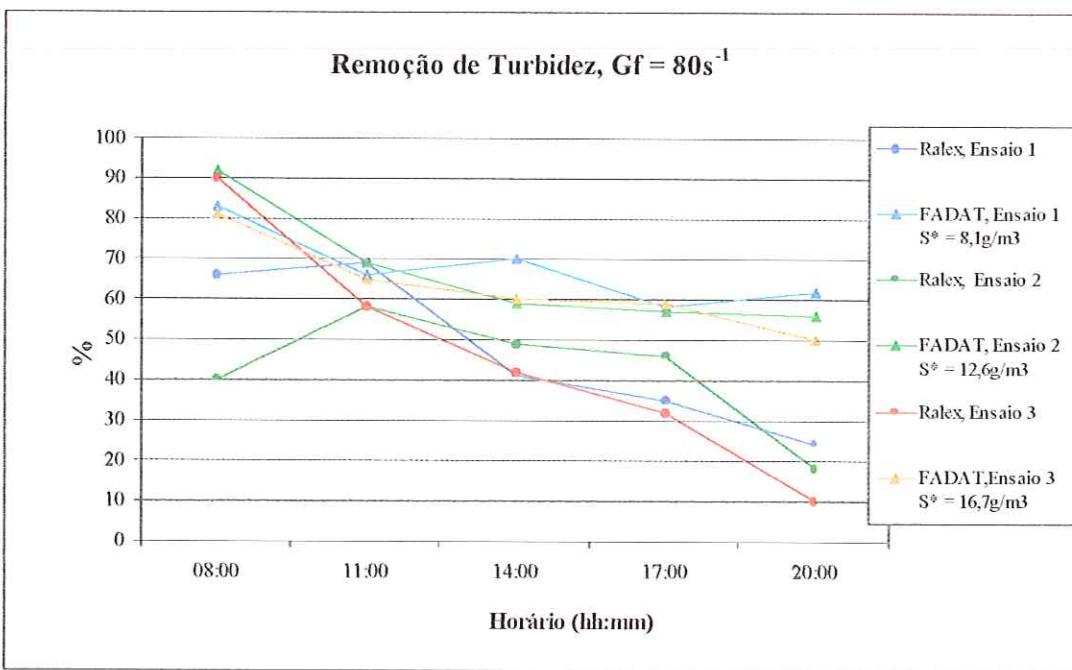


GRÁFICO 5.45 - Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

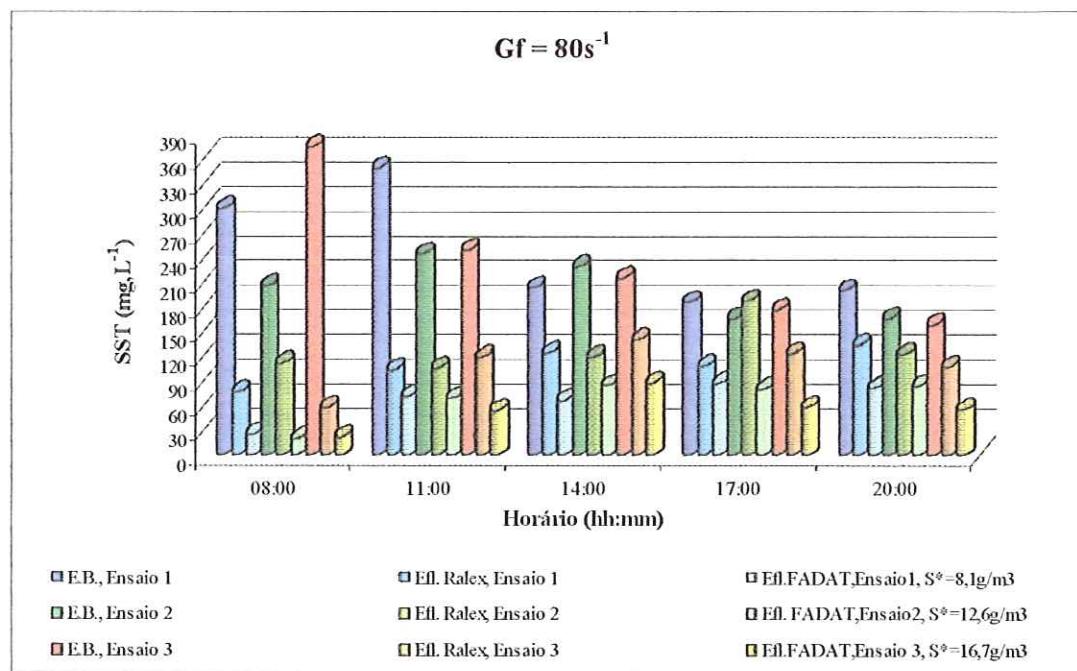


GRÁFICO 5.46 - SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20\text{ min.}$ ;  $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ;  $TAS = 42\text{ m/h}$ ;  $DCF = 50\text{ mg/L}$ ;  $Gf = 0\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

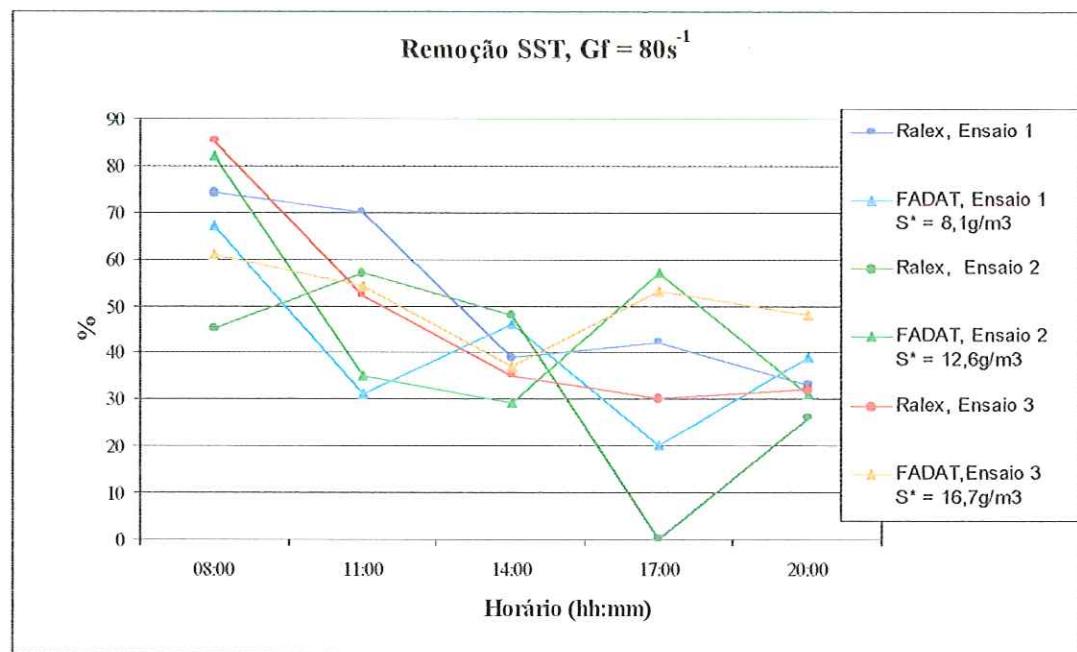
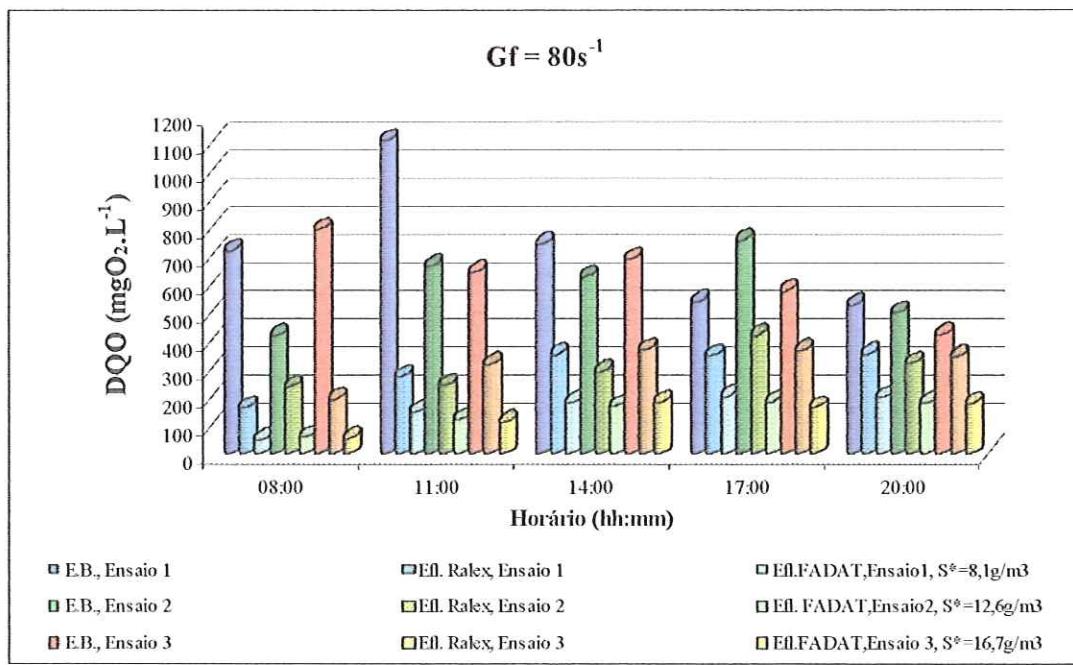
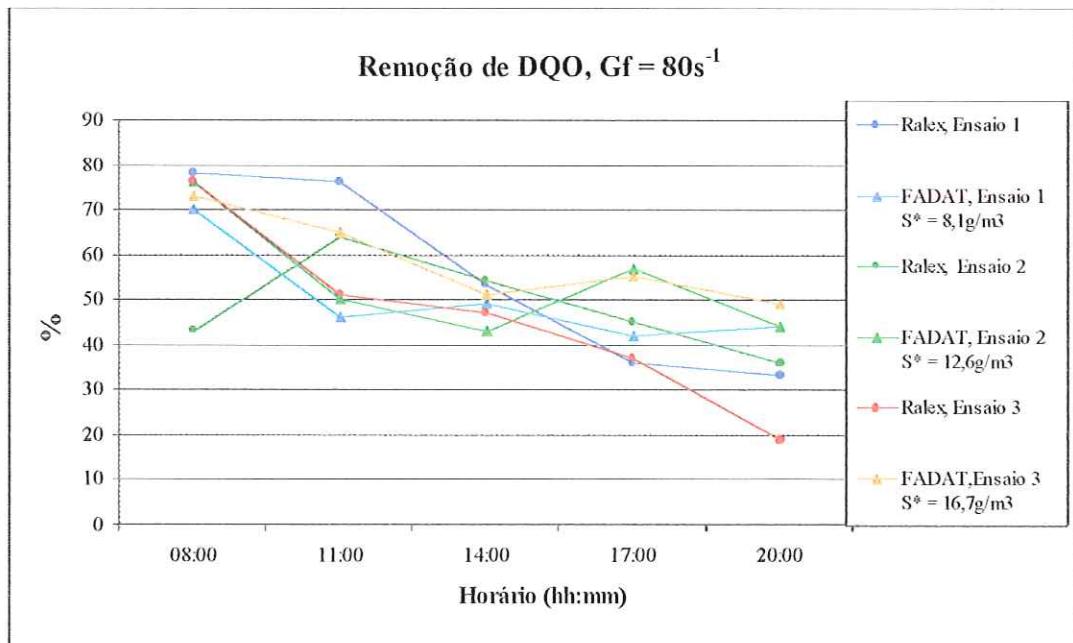


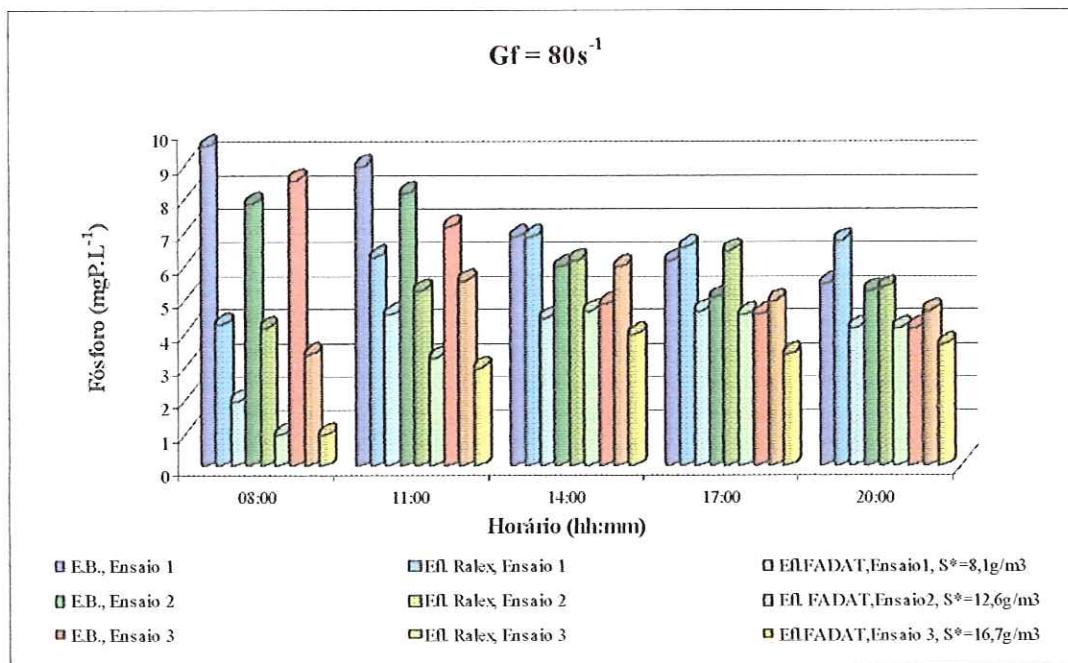
GRÁFICO 5.47- Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20\text{ min.}$ ;  $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ;  $TAS = 42\text{ m/h}$ ;  $DCF = 50\text{ mg/L}$ ;  $Gf = 80\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.



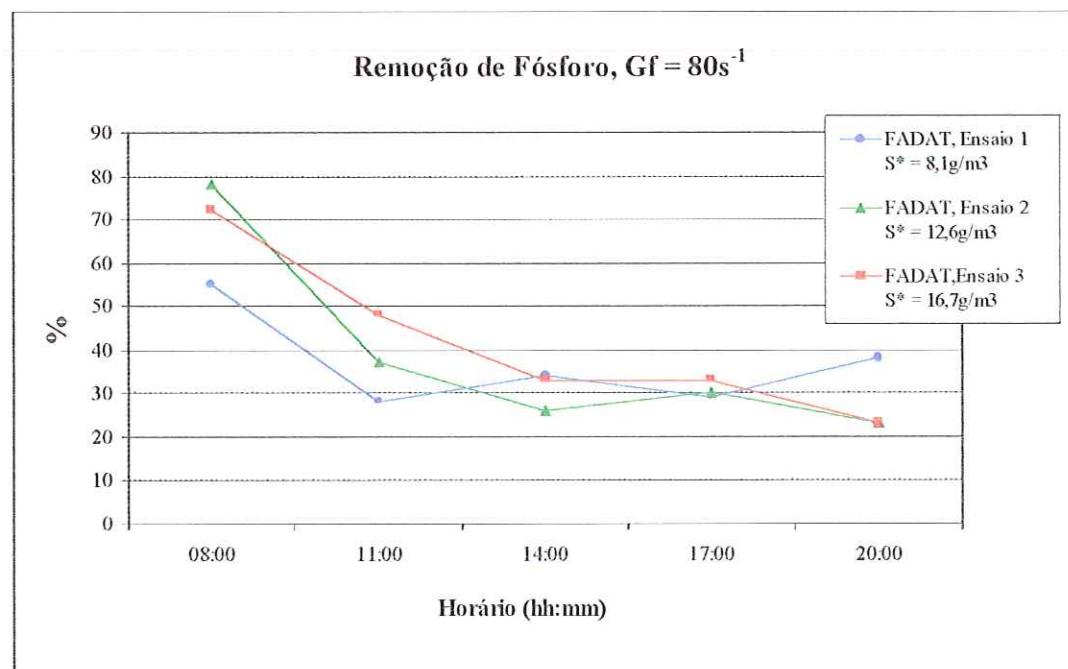
**GRÁFICO 5.48 - Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT).** Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.



**GRÁFICO 5.49 - Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT.** Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.



**GRÁFICO 5.50 -** Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.



**GRÁFICO 5.51 -** Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

TABELA 3.6- Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; G<sub>f</sub> = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 3)

G <sub>f</sub> = 80 s <sup>-1</sup>												
	Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Média ao longo das 12 h (EB)	332	315	392	248	202	235	728	593	626	7	6	6
Média ao longo das 12 h (Efl. Ralex)	163	177	154	110	130	110	297	301	317	6	5	5
Média ao longo das 12h(Efl. FADAT)	55	62	60	67	68	56	155	141	137	4	3	3

Tempo (h)	Sistema	Eficiência de Remoção %												
		Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)			
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
08:00	Ralex	66	40	90	74	45	85	78	43	76	56	48	61	
	FADAT	83	92	81	67	82	61	70	76	73	55	78	72	
	Ralex + FADAT	94	95	98	91	90	94	93	87	93	81	89	89	
11:00	Ralex	69	58	58	70	57	52	76	64	51	30	36	22	
	FADAT	66	69	65	31	35	54	46	50	65	28	37	48	
	Ralex + FADAT	89	87	85	79	72	78	87	82	83	49	60	59	
14:00	Ralex	41	49	42	39	48	35	53	54	47	1	-4	-23	
	FADAT	70	59	60	46	29	37	49	43	51	34	26	33	
	Ralex + FADAT	83	79	77	67	63	59	76	73	74	35	22	18	
17:00	Ralex	35	46	32	42	-13	30	36	45	37	-7	-26	-10	
	FADAT	58	57	59	20	57	53	42	57	55	29	30	33	
	Ralex + FADAT	72	77	72	53	52	67	62	76	72	24	11	27	
20:00	Ralex	24	18	10	33	26	32	33	36	19	-23	-3	-13	
	FADAT	62	56	50	39	31	48	44	44	49	38	23	23	
	Ralex + FADAT	71	64	55	59	49	65	62	64	58	24	21	13	
Média ao longo das 12 h (Ralex)		47	42	46	52	33	47	55	48	46	11	10	7	
Média ao longo das 12 h (FADAT)		68	66	63	40	47	51	50	54	58	37	39	42	
Média ao longo das 12h(Ralex+FADAT)		82	80	77	70	65	73	76	76	76	43	41	41	

#### **5.4.2.2 Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo, utilizando DCF de 50 mg/L, Gf de 100 s<sup>-1</sup>.**

Na Tabela 3.7 encontram-se apresentados os resultados obtidos na investigação do gradiente médio de velocidade de floculação de 100 s<sup>-1</sup> com aplicação de 50 mg/L de cloreto férrico, para tempo de floculação (Tf) de 20 min. e taxa de aplicação superficial (42 m/h), variando-se a fração de recirculação entre 8,1 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

Nessa etapa de ensaios, tanto o esgoto bruto quanto o efluente do reator Ralex apresentaram variações nas características, apresentando no final das 12 h de cada ensaio diferentes valores médios de turbidez, SST, DQO e fósforo. A maior concentração de tais parâmetros observados no esgoto bruto (ensaio 1), conferiu ao efluente do reator Ralex qualidade inferior quando comparado aos efluentes caracterizados nos ensaios 2 e 3.

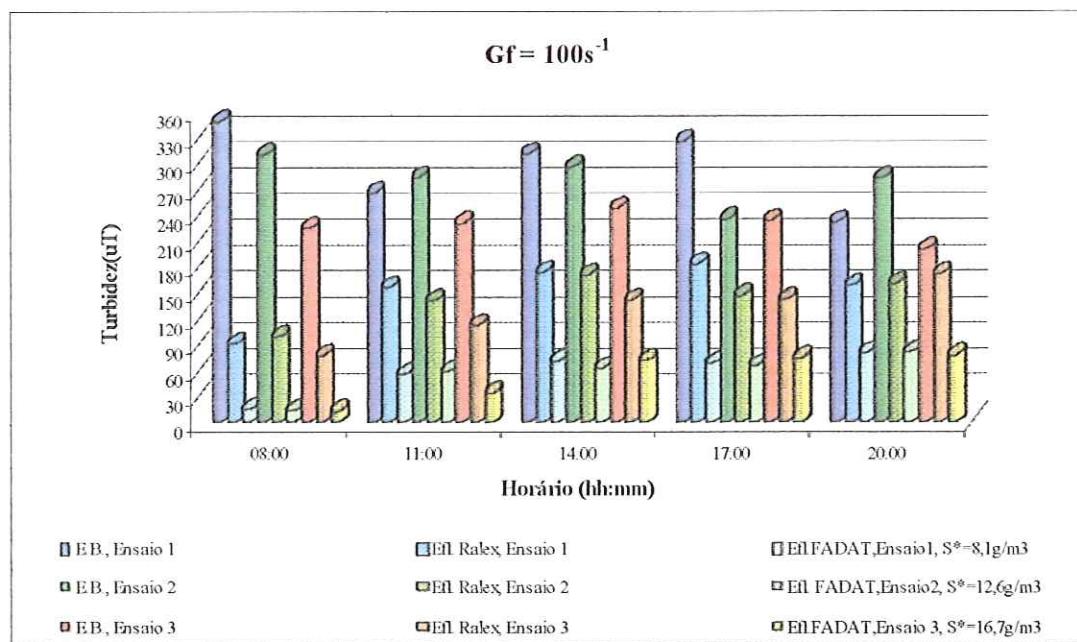
Analizando-se a Tabela 3.7 e os Gráficos 5.52 a 5.59, observa-se que em relação à eficiência média de remoção de turbidez, os valores investigados de quantidade de ar (8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente), forneceram resultados bastante semelhantes, sendo que a quantidade 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente proporcionou eficiência de remoção ligeiramente superior, 64% de remoção na unidade FADAT. Quanto à eficiência média de remoção de sólidos suspensos (SST), verifica-se que para 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente, a unidade FADAT alcançou a máxima eficiência, (60%, com residual de 5 a 83 mg/L de SST). Em relação à remoção de DQO, nota-se que a utilização de 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente forneceu a maior eficiência média de remoção na unidade piloto FADAT (56%, com residual entre 55 e 191 mgO<sub>2</sub>/L). A maior remoção média de fósforo observada na unidade piloto foi de 45% (P residual entre 0,6 e 3,8 mg/L) com aplicação de 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

O desempenho da unidade piloto FADAT nos três ensaios realizados ao longo das 12 h de operação (8h às 20h) foi bastante semelhante. A qualidade do efluente da FADAT apresentou pequenas variações nos três ensaios realizados e os residuais médios dos parâmetros analisados situaram-se entre os seguintes intervalos: turbidez

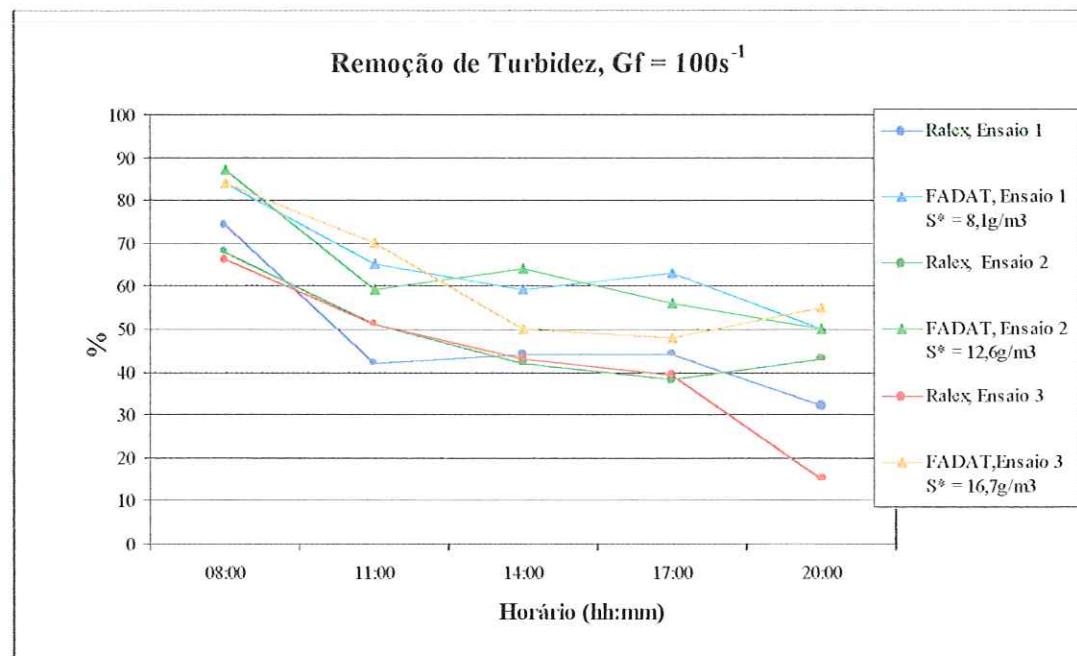
de 53 a 57 uT, SST de 47 a 63 mg/L, DQO de 120 a 160 mgO<sub>2</sub>/L. A concentração de fósforo se manteve em 3 mgP/L.

Considerando a eficiência global do sistema de tratamento Ralex-FADAT observa-se que os três valores de quantidade de ar fornecido para a flotação (8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente) apresentaram eficiências de remoção bastante semelhantes. Sendo que para a melhor condição de S\* foram observadas as seguintes remoções: 80% de turbidez, 82% de SST, 75% de DQO e 46% de fósforo.

Com TAS de 42 m/h e DCF de 50mg/L, nota-se que os valores de gradiente médio de velocidade de flocação investigados (80 s<sup>-1</sup> e 100 s<sup>-1</sup>) apresentaram resultados próximos.



**GRÁFICO 5.52 -** Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.



**GRÁFICO 5.53 -** Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

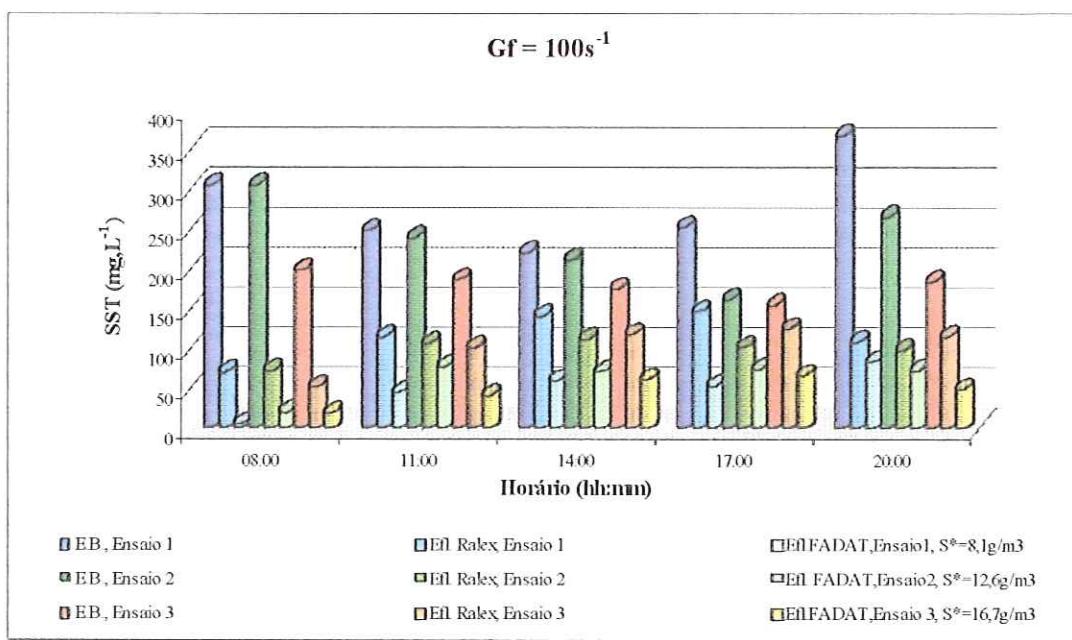


GRÁFICO 5.54 - SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20\text{ min.}$ ;  $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ;  $TAS = 42\text{ m/h}$ ;  $DCF = 50\text{ mg/L}$ ;  $Gf = 100\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

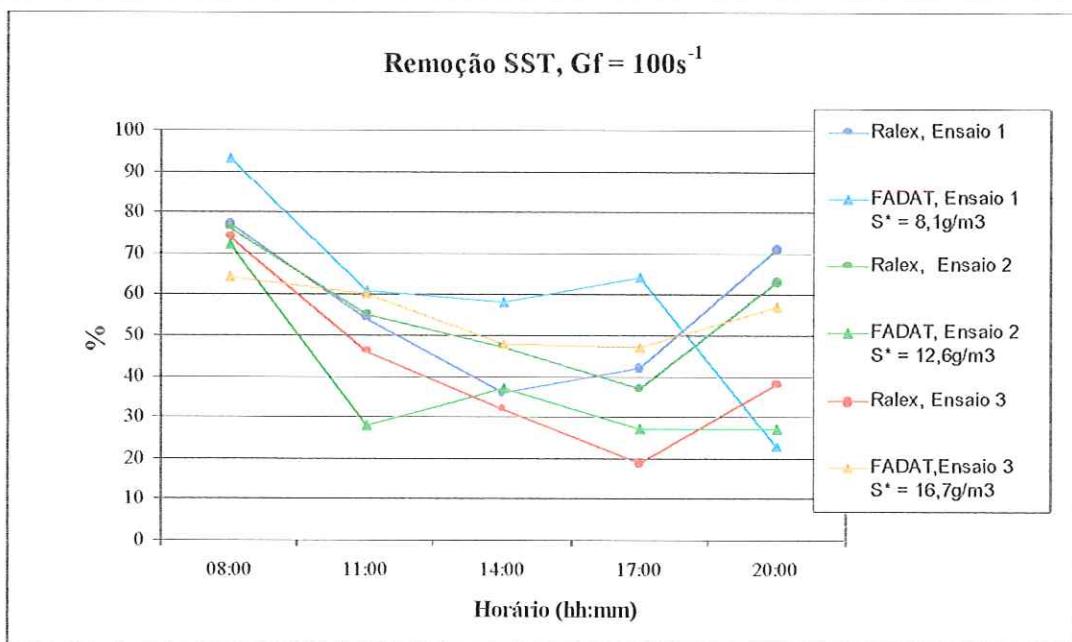
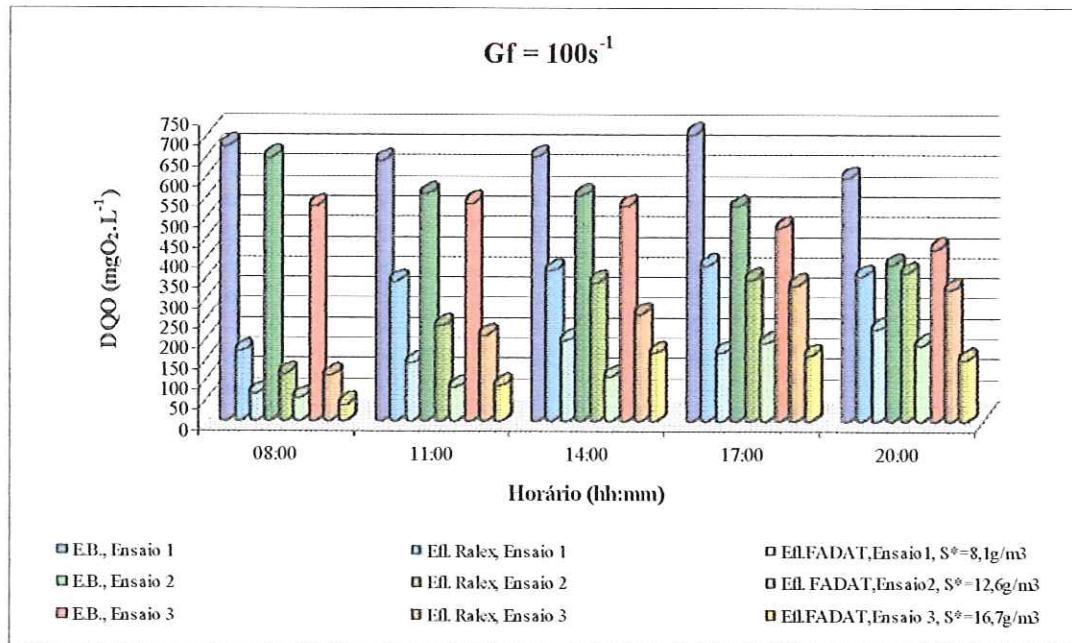
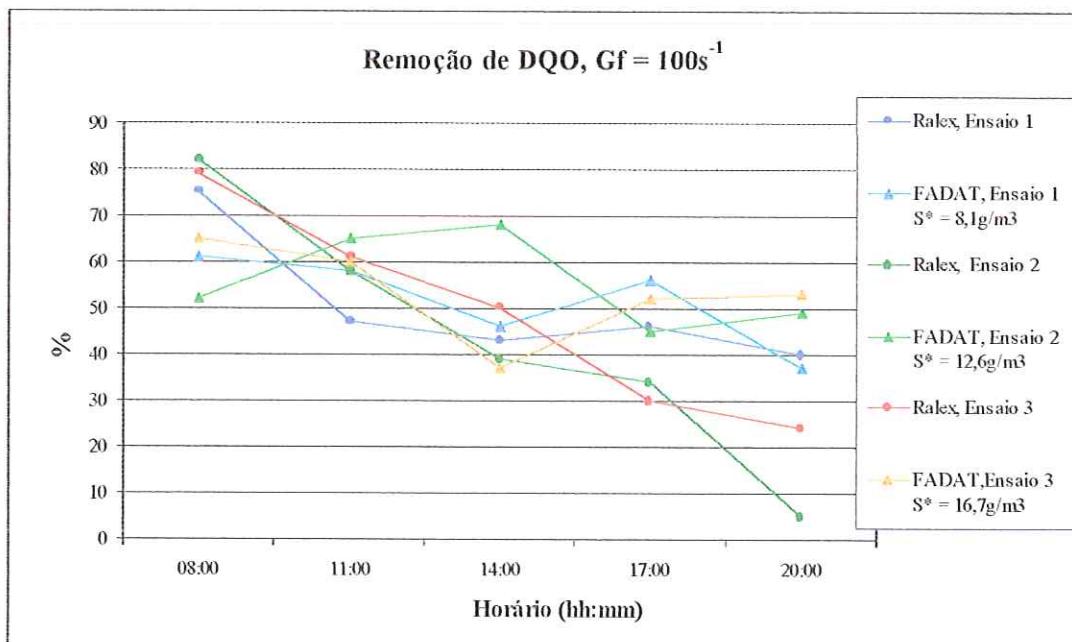


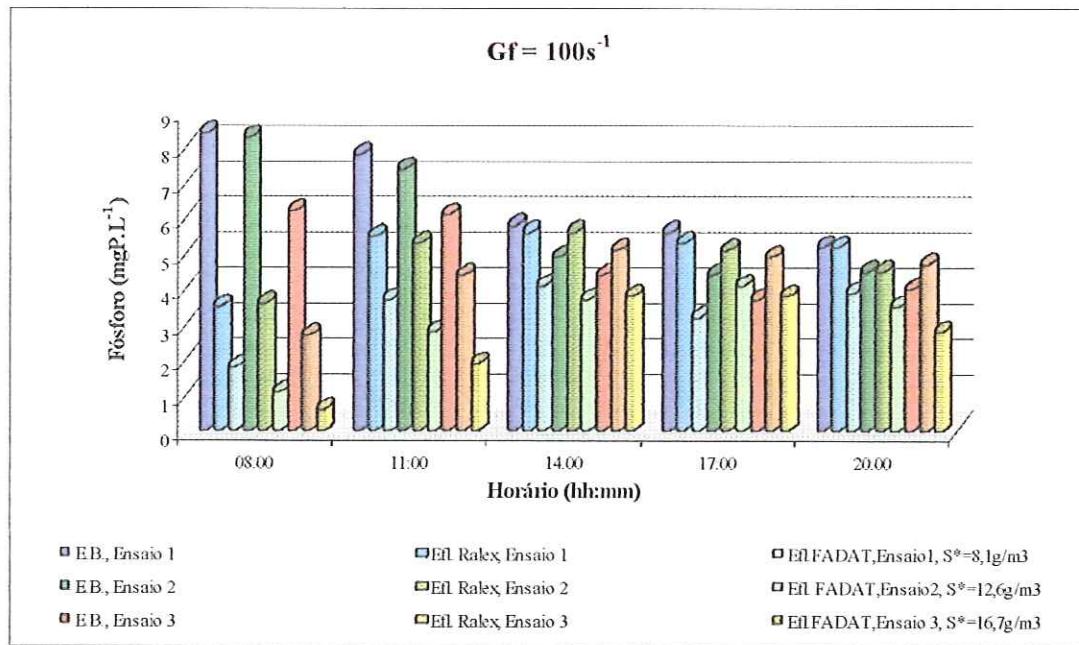
GRÁFICO 5.55 - Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20\text{ min.}$ ;  $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ;  $TAS = 42\text{ m/h}$ ;  $DCF = 50\text{ mg/L}$ ;  $Gf = 100\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.



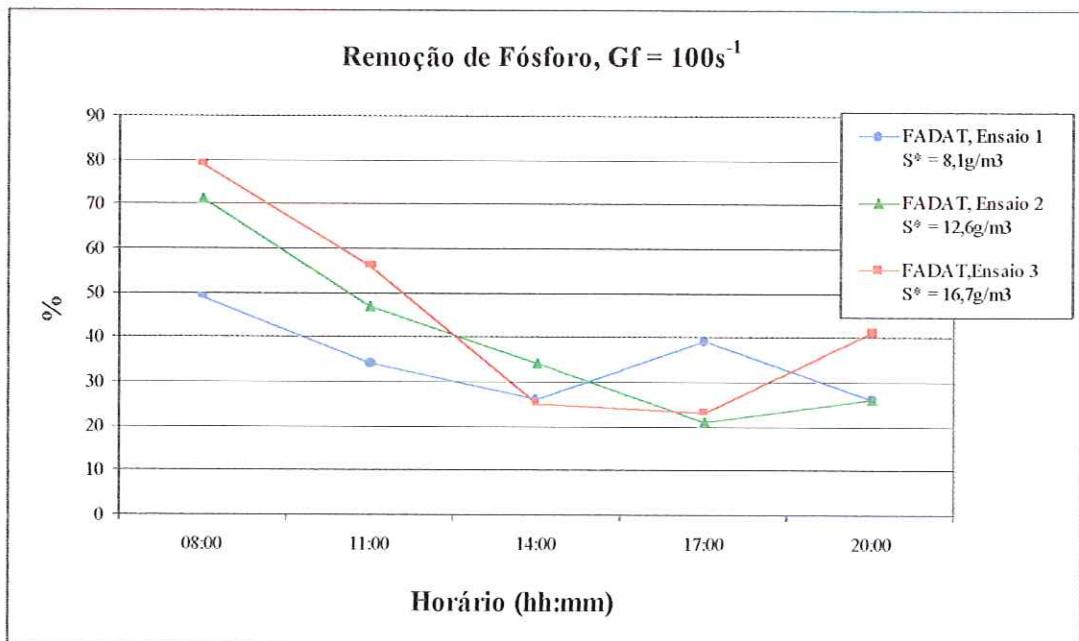
**GRÁFICO 5.56 - Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.**



**GRÁFICO 5.57 - Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.**



**GRÁFICO 5.58** - Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.



**GRÁFICO 5.59** - Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

TABELA 3.7- Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 50 mg/L; G<sub>f</sub> = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 3)

Gf = 100 s <sup>-1</sup>												
	Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Média ao longo das 12 h (EB)	296	281	227	279	237	180	654	534	498	7	6	5
Média ao longo das 12 h (Efl. Ralex)	152	143	128	116	98	102	324	280	248	5	5	4
Média ao longo das 12h(Efl. FADAT)	57	55	53	49	63	47	160	124	120	3	3	3

Tempo (h)	Sistema	Eficiência de Remoção %												
		Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)			
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
08:00	Ralex	74	68	66	77	76	74	75	82	79	58	57	57	
	FADAT	84	87	84	93	72	64	61	52	65	49	71	79	
	Ralex + FADAT	96	96	95	98	93	91	90	92	93	79	87	91	
11:00	Ralex	42	51	51	54	55	46	47	58	61	29	29	27	
	FADAT	65	59	70	61	28	60	58	65	60	34	47	56	
	Ralex + FADAT	79	80	86	82	68	78	78	85	84	53	62	68	
14:00	Ralex	44	42	43	36	47	32	43	39	50	4	-14	-16	
	FADAT	59	64	50	58	37	48	46	68	37	26	34	25	
	Ralex + FADAT	77	79	71	73	67	65	70	81	69	29	25	13	
17:00	Ralex	44	38	39	42	37	19	46	34	30	5	-16	-33	
	FADAT	63	56	48	64	27	47	56	45	52	39	21	23	
	Ralex + FADAT	79	72	68	79	54	57	76	64	66	42	8	-2	
20:00	Ralex	32	43	15	71	63	38	40	5	24	1	-8	-16	
	FADAT	50	50	55	23	27	57	37	49	53	26	26	41	
	Ralex + FADAT	66	72	62	77	73	73	62	52	64	26	21	31	
Média ao longo das 12 h (Ralex)		47	48	43	56	56	42	50	44	49	19	10	4	
Média ao longo das 12 h (FADAT)		64	63	62	60	38	55	52	56	53	35	40	45	
Média ao longo das 12h(Ralex+FADAT)		80	80	76	82	71	73	75	75	75	46	41	40	

#### **5.4.2.3 Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo, utilizando DCF de 70 mg/L, Gf de 80 s<sup>-1</sup>**

A Tabela 3.8 apresenta os resultados obtidos no ensaio realizado em que foi estudado o gradiente médio de velocidade de flocação de 80 s<sup>-1</sup>, para tempo de flocação (Tf) de 20 min., taxa de aplicação superficial (42 m/h), dosagem de cloreto férreo (DCF) de 70 mg/L e valores de quantidade de ar fornecido para a flotação de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 1; 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 2 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 3.

Nos três ensaios realizados nessa fase da pesquisa tanto o esgoto bruto quanto o efluente do reator anaeróbio Ralex apresentaram características fisico-químicas variáveis ao longo do dia e na média final, após 12 horas de ensaios, valores ligeiramente distintos. Em função dessa variabilidade da qualidade do esgoto bruto e do efluente anaeróbio, as concentrações de turbidez, SST, DQO e fósforo observadas, apresentaram valores médios diferentes em cada ensaio realizado.

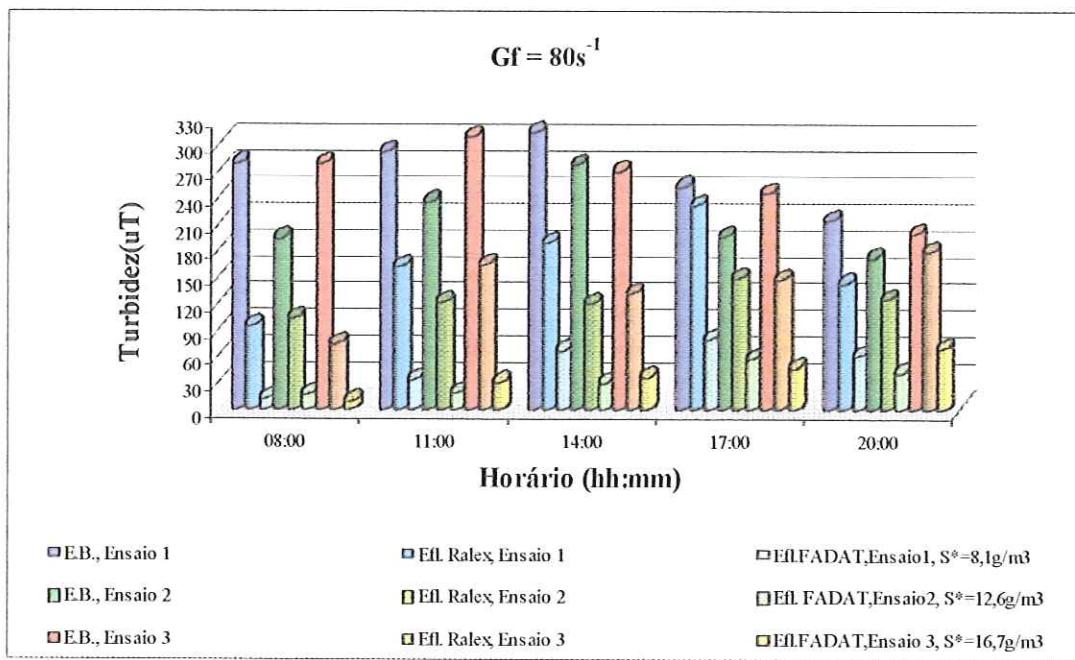
Conforme visualizado na Tabela 3.8 e nos Gráficos 5.60 a 5.67, verifica-se que dentre os valores investigados, a quantidade de 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente proporcionou a maior média de remoção de turbidez (75%, com residual entre 16,5 a 56,6 uT.). Quanto à remoção de SST, nota-se que o fornecimento de 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente proporcionou a maior média de remoção (57% e residual variando de 14 a 49 mg/L de SST) na unidade FADAT. Em relação à remoção de DQO, a quantidade de 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente proporcionou a melhor eficiência média de remoção de DQO na unidade FADAT (71%, com residual entre 23 a 120 mgO<sub>2</sub>/L). No que concerne à remoção de fósforo, os ensaios realizados com 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente forneceram eficiências médias de remoção na FADAT de 61% com P residual entre 0,6 e 2,6 mg/L e entre 0,5 e 2,7 mg/L, respectivamente.

Em função da variabilidade do efluente do reator Ralex, a qualidade do efluente da unidade piloto FADAT também apresentou variações ao longo de 12 h de operação e valores médios finais diferentes nos três ensaios realizados. Tal comportamento do efluente do reator Ralex não comprometeu o desempenho semelhante da unidade piloto FADAT nos três ensaios realizados.

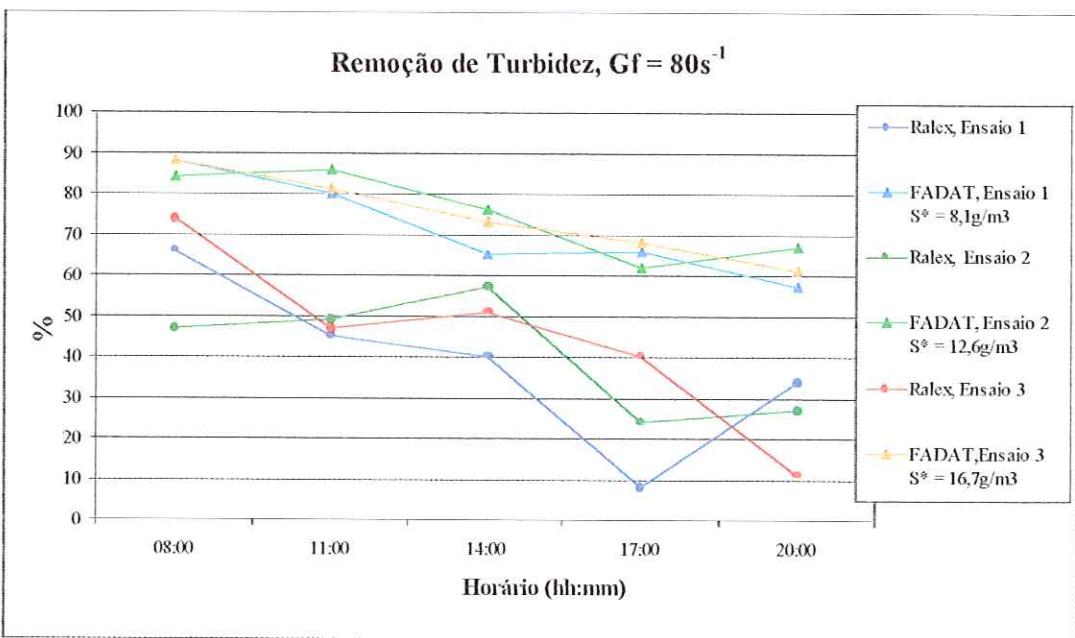


Considerando-se o sistema Ralex-FADAT nota-que a aplicação de 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente apresentou as seguintes eficiências médias de remoção ao longo de 12 h de operação: 84% de turbidez, 79% de SST, 84% de DDQ e 63% de fósforo. Nessa condição os residuais médios ao longo de 12 h no efluente final foram: 32uT de turbidez, 32 mg/L de SST, 78 mgO<sub>2</sub>/L de DQO e 2 mgP/L de fósforo.

É interessante observar que nesse caso, com taxa de aplicação superficial de 42 m/h, o aumento da quantidade de ar fornecido para a flotação proporcionou ligeira melhora no desempenho da unidade FADAT e do sistema global de tratamento Ralex-FADAT.



**GRÁFICO 5.60 - Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.**



**GRÁFICO 5.61 - Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.**

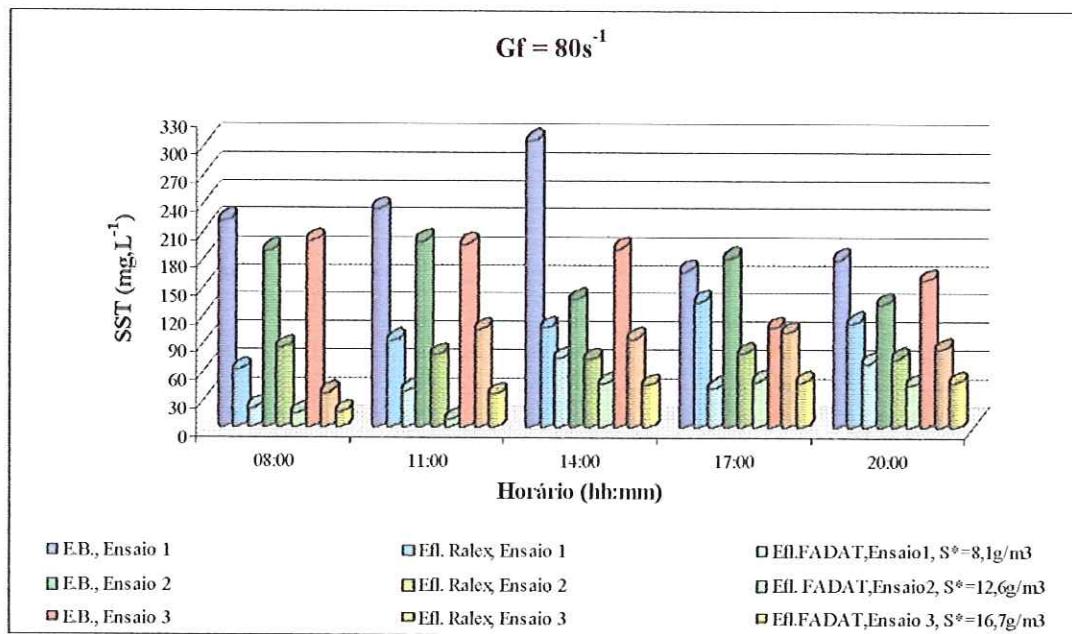


GRÁFICO 5.62 - SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20$  min.;  $P_{sat} = 450$  kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L;  $G_f = 80\text{s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

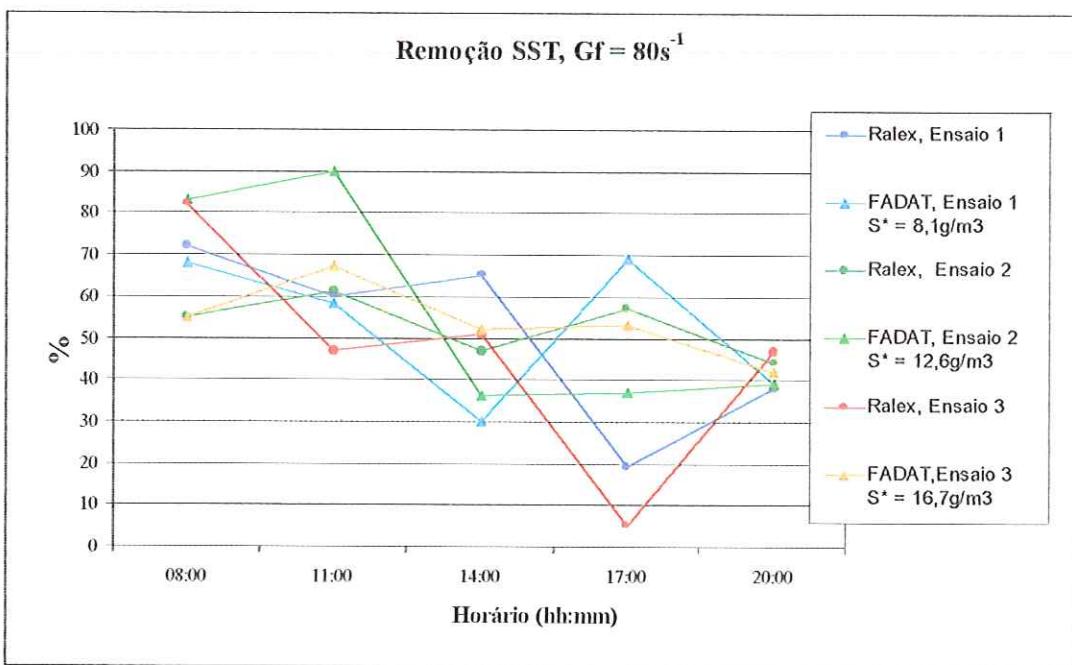
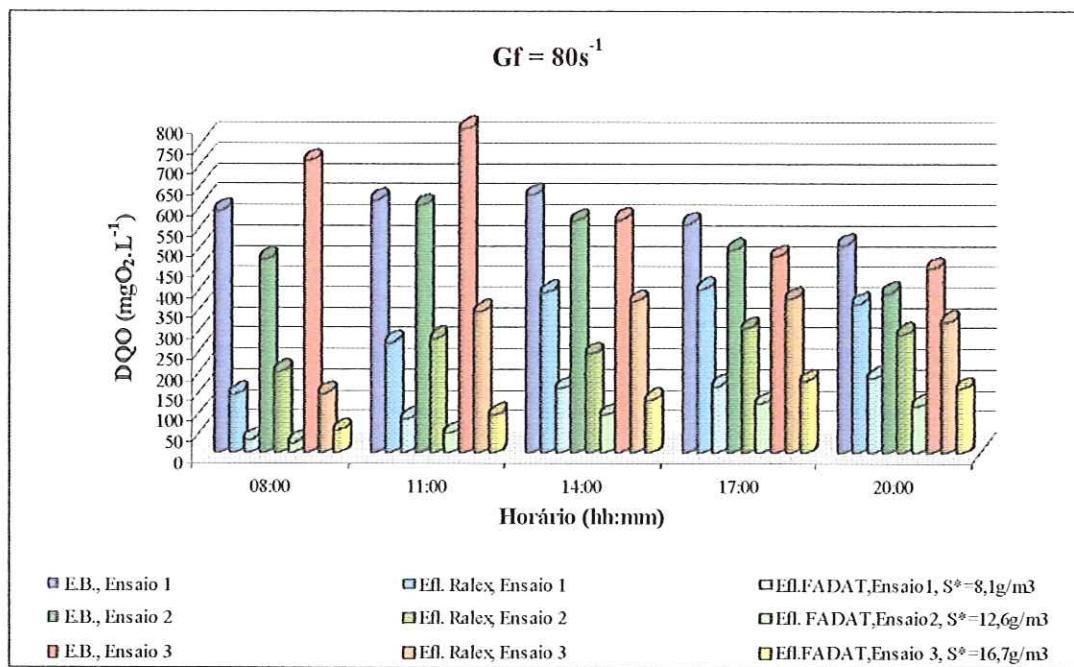
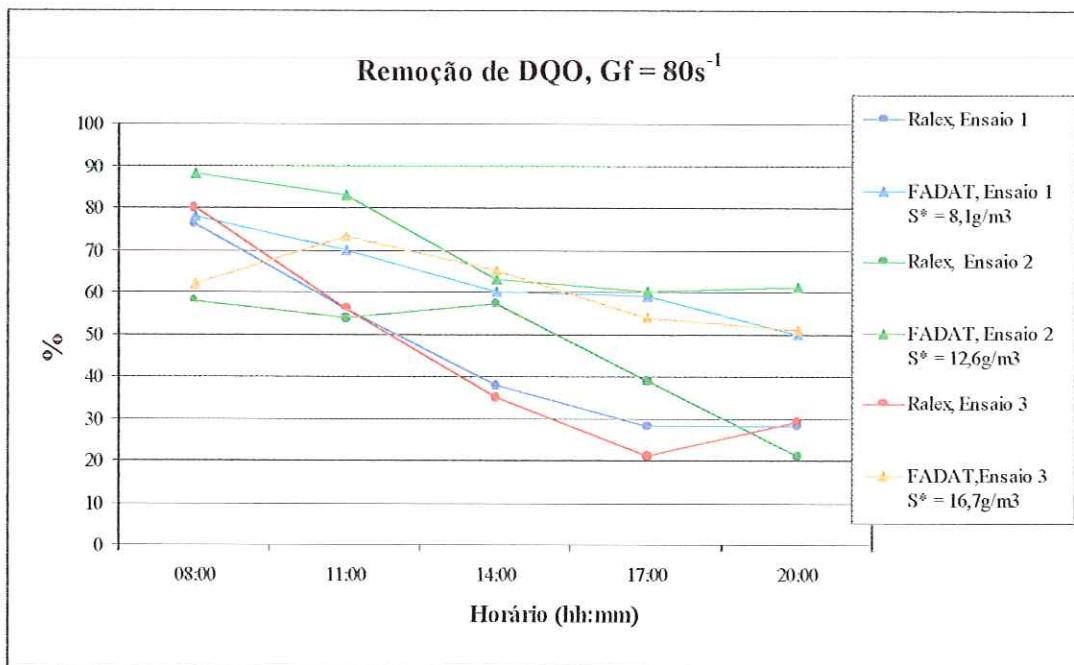


GRÁFICO 5.63 - Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20$  min.;  $P_{sat} = 450$  kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L;  $G_f = 80\text{s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.



**GRÁFICO 5.64 - Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT).** Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.



**GRÁFICO 5.65 - Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT.** Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

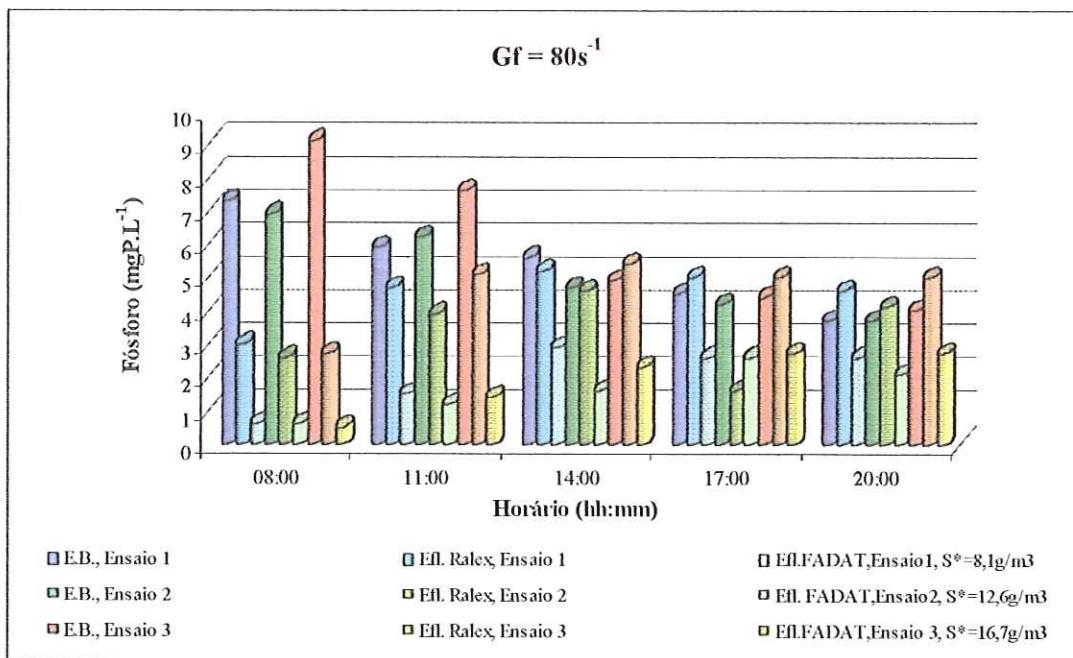


GRÁFICO 5.66 - Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20\text{ min.}$ ;  $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ;  $TAS = 42\text{ m/h}$ ;  $DCF = 70\text{ mg/L}$ ;  $G_f = 80\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

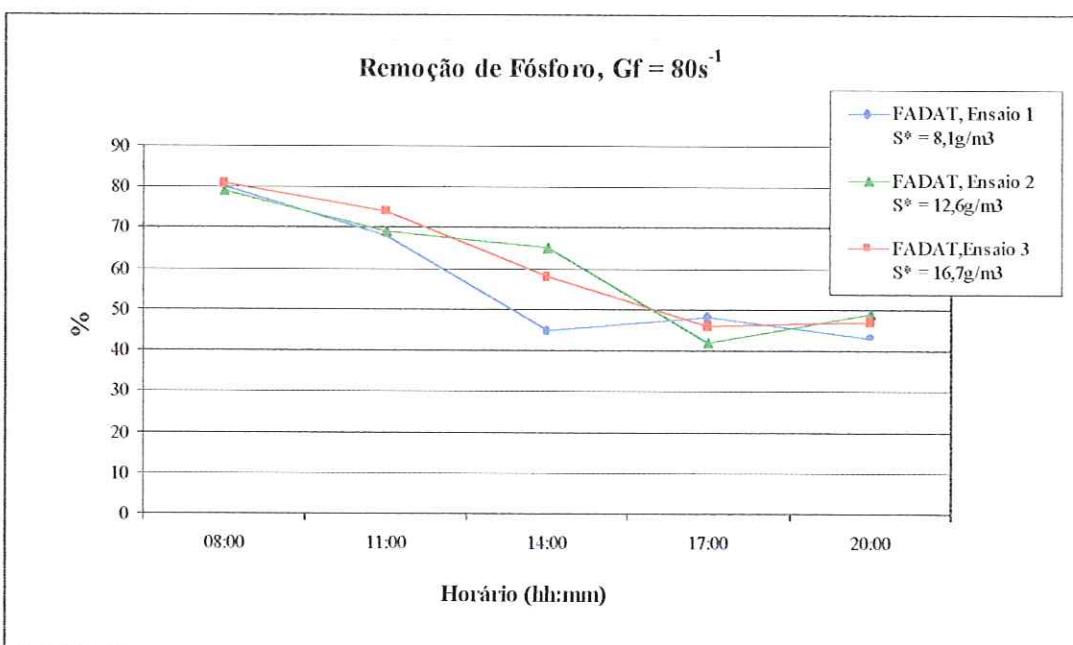


GRÁFICO 5.67 - Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex. Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20\text{ min.}$ ;  $P_{sat} = 450\text{ kPa}$ ;  $TAS = 42\text{ m/h}$ ;  $DCF = 70\text{ mg/L}$ ;  $G_f = 80\text{ s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

TABELA 3.8- Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; G<sub>f</sub> = 80 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 3)

G <sub>f</sub> = 80 s <sup>-1</sup>												
	Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Média ao longo das 12 h (EB)	270	214	260	220	167	169	578	503	598	5	5	6
Média ao longo das 12 h (Efl. Ralex)	164	123	138	101	77	84	312	261	309	4	4	5
Média ao longo das 12h(Efl. FADAT)	50	32	38	49	32	38	122	78	121	2	2	2

Tempo (h)	Sistema	Eficiência de Remoção %												
		Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)			
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
08:00	Ralex	66	47	74	72	55	82	76	58	80	59	63	70	
	FADAT	88	84	88	68	83	55	78	88	62	80	79	81	
	Ralex + FADAT	96	91	97	91	92	92	95	95	92	92	92	94	
11:00	Ralex	45	49	47	60	61	47	56	54	56	21	37	32	
	FADAT	80	86	81	58	90	67	70	83	73	68	69	74	
	Ralex + FADAT	89	93	90	83	96	82	87	92	88	74	80	82	
14:00	Ralex	40	57	51	65	47	51	38	57	35	7	3	-10	
	FADAT	65	76	73	30	36	52	60	63	65	45	65	58	
	Ralex + FADAT	79	89	87	76	66	76	75	84	77	48	66	53	
17:00	Ralex	8	24	40	19	57	5	28	39	21	-11	-10	-13	
	FADAT	66	62	68	69	37	53	59	60	54	48	42	46	
	Ralex + FADAT	68	71	81	74	73	55	71	76	63	43	37	38	
20:00	Ralex	34	27	11	38	44	47	28	26	29	-22	-13	-16	
	FADAT	57	67	61	39	39	42	50	61	51	43	49	47	
	Ralex + FADAT	72	76	65	62	66	69	64	71	65	31	42	39	
Média ao longo das 12 h (Ralex)		39	41	45	51	53	46	45	47	44	11	16	13	
Média ao longo das 12 h (FADAT)		71	75	74	53	57	54	63	71	61	57	61	61	
Média ao longo das 12h(Ralex+FADAT)		81	84	84	77	79	75	78	84	77	57	63	61	

#### **5.4.2.4 Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo, utilizando DCF de 70 mg/L, Gf de 100 s<sup>-1</sup>.**

Na Tabela 3.9, apresentam-se os resultados referentes ao ensaio em que foi avaliada taxa de aplicação superficial de 42 m/h associada a tempo de floculação (Tf) de 20 min. e gradiente médio de velocidade de floculação de 100 s<sup>-1</sup> com aplicação de 70 mg/L de cloreto férrico. Nessas condições foram analisados os seguintes valores de quantidade de ar fornecida para a flotação: 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 1; 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 2 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 3.

A qualidade do esgoto bruto apresentou variações nos três ensaios realizados ao longo de 12 horas. As características físico-químicas do esgoto bruto no ensaio 1 apresentaram média de valores mais elevadas se comparadas às médias observadas nos ensaios 2 e 3, que apresentaram valores mais próximos. A qualidade do efluente do reator Ralex apresentou pequenas variações nos três ensaios realizados, com valores semelhantes de turbidez, SST e fósforo. Em relação a DQO, os valores observados no ensaio 1, foram maiores se comparados com os obtidos nos ensaios 2 e 3, proporcionando consequentemente um valor médio mais elevado no final de 12 h de ensaio.

Verifica-se, através da análise da Tabela 3.9 e dos Gráficos 5.68 a 5.75, que em relação a turbidez, a remoção média na unidade FADAT para os três valores de quantidade de ar testados foram bastante similares (entre 79 e 80%), sendo que, a quantidade de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente forneceu média ligeiramente maior de remoção (80%, com residual entre 8,53 e 57 uT). No que se refere à remoção de SST, verifica-se que a maior média de remoção na unidade FADAT (66%, residual de 10 a 68 mg/L de SST) foi alcançada com 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente. Quanto a DQO, observa-se que o fornecimento de 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente proporcionaram o mesmo resultado de eficiência média de remoção na unidade FADAT (70%), com residual entre 24 e 110 mgO<sub>2</sub>/L e entre 15 e 158 mgO<sub>2</sub>/L, respectivamente. Em relação à remoção de fósforo, verifica-se que 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente forneceu a maior eficiência média (73%), com residual de 0,2 a 2,3 mgP/L na unidade piloto FADAT.

O desempenho da unidade piloto FADAT nos três ensaios realizados ao longo das 12 h de operação foi bastante semelhante. No ensaio 1, a elevada concentração de DQO (média de 128 mgO<sub>2</sub>/L) presente no efluente da unidade FADAT é consequência da baixa qualidade do efluente do reator Ralex que também apresentava altas concentrações de DQO (média de 357 mgO<sub>2</sub>/L). Em relação a turbidez, SST e fósforo o efluente da FADAT apresentou pequenas variações nos três ensaios realizados, e os residuais médios desses parâmetros analisados situaram-se entre os seguintes intervalos: de 35 a 39 uT, de 38 a 51 mg/L SST e de 1 a 2 mgP/L, respectivamente.

Quanto à remoção global no sistema Ralex-FADAT, observa-se que os três valores de quantidade de ar estudados forneceram resultados bastante semelhantes, apresentando para a melhor condição de S\* as seguintes remoções: 88% de turbidez, 79% de SST, 85% de DQO e 73% de fósforo.

Comparando-se os resultados obtidos com a utilização de TAS de 42m/h e DCF de 70 mg/L, os valores de gradiente médio de velocidade de flocação estudados, apresentaram resultados bastante próximos, sendo que o Gf de 100 s<sup>-1</sup> forneceu resultados ligeiramente superiores. Verifica-se que aumento da quantidade de ar fornecido para a flotação proporcionou ligeira melhora no desempenho da unidade FADAT e do sistema global de tratamento Ralex-FADAT.

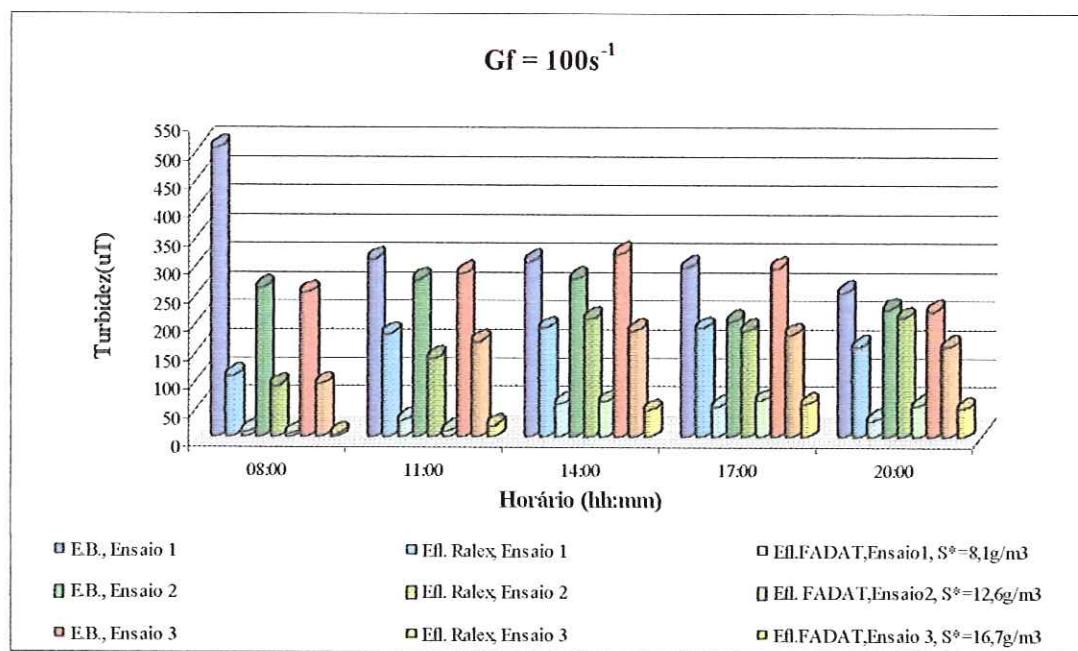


GRÁFICO 5.68 - Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

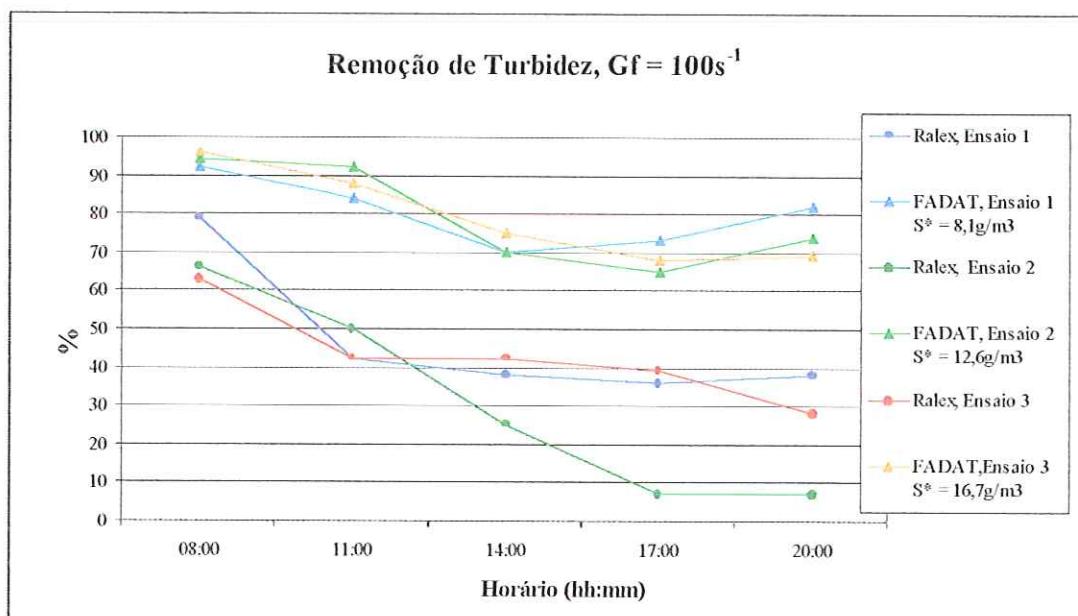
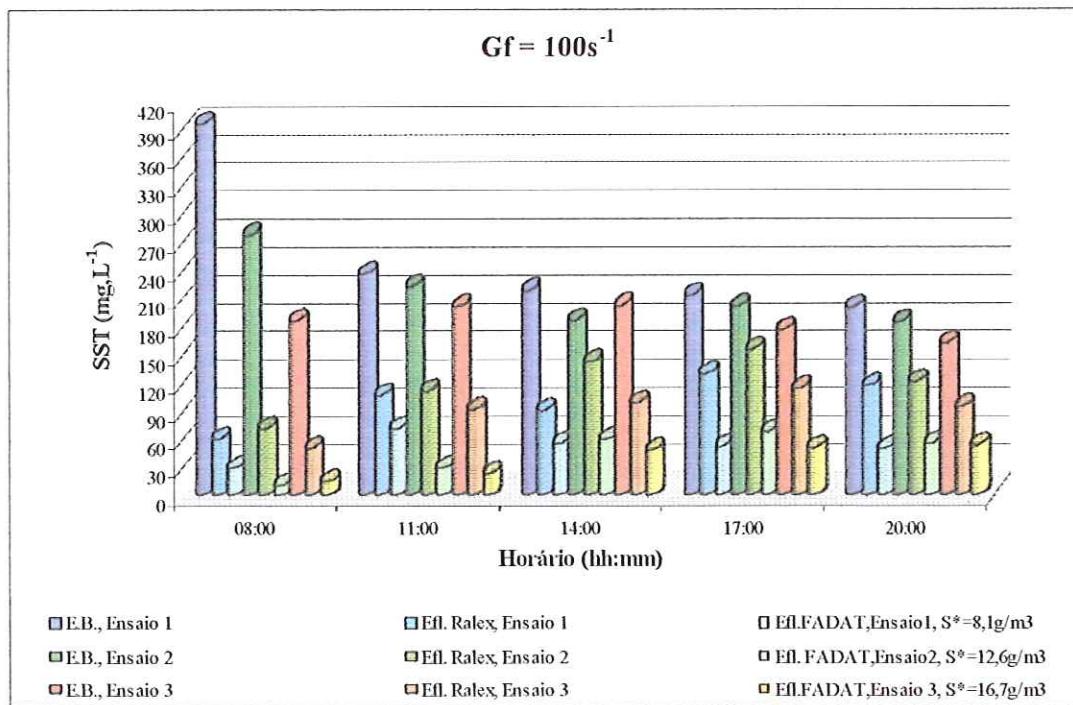
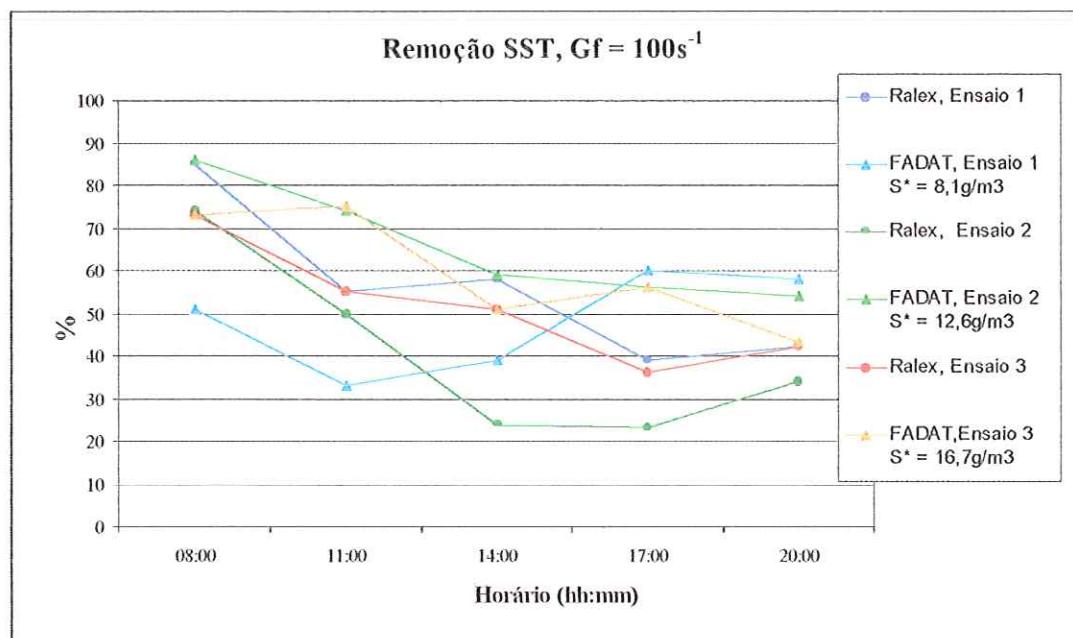


GRÁFICO 5.69 - Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.



**GRÁFICO 5.70 - SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.**



**GRÁFICO 5.71 - Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.**

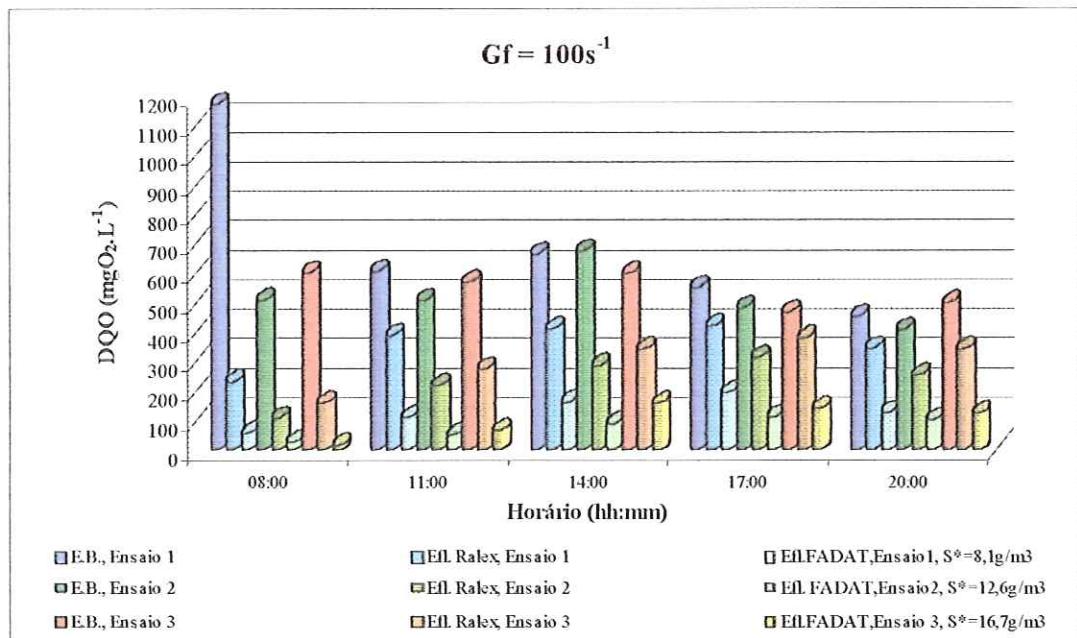


GRÁFICO 5.72 - Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20$  min.;  $P_{sat} = 450$  kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L;  $G_f = 100\text{s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

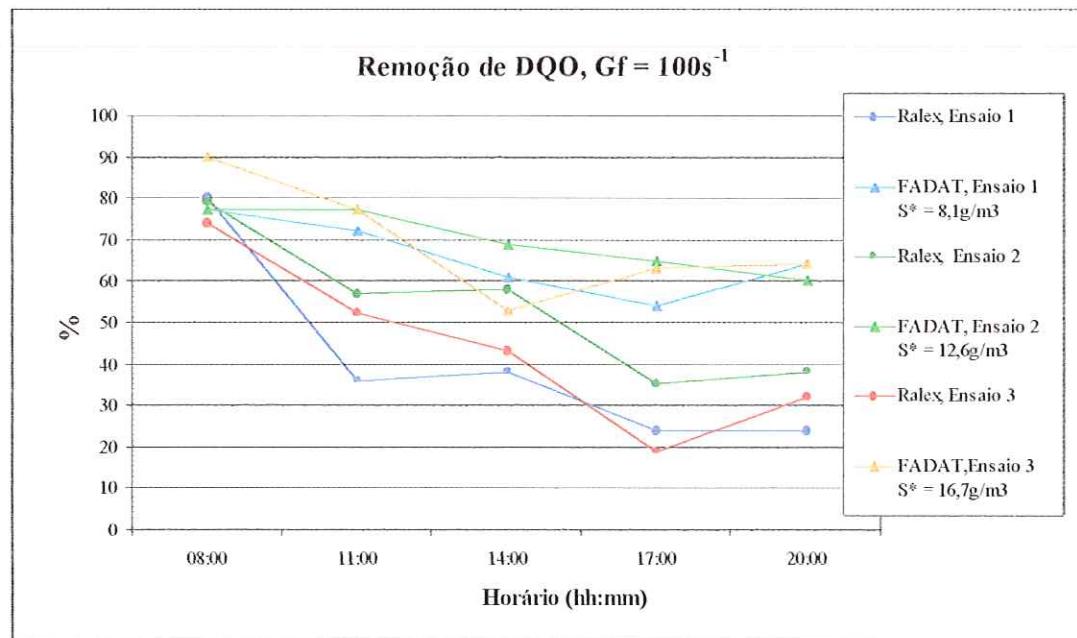
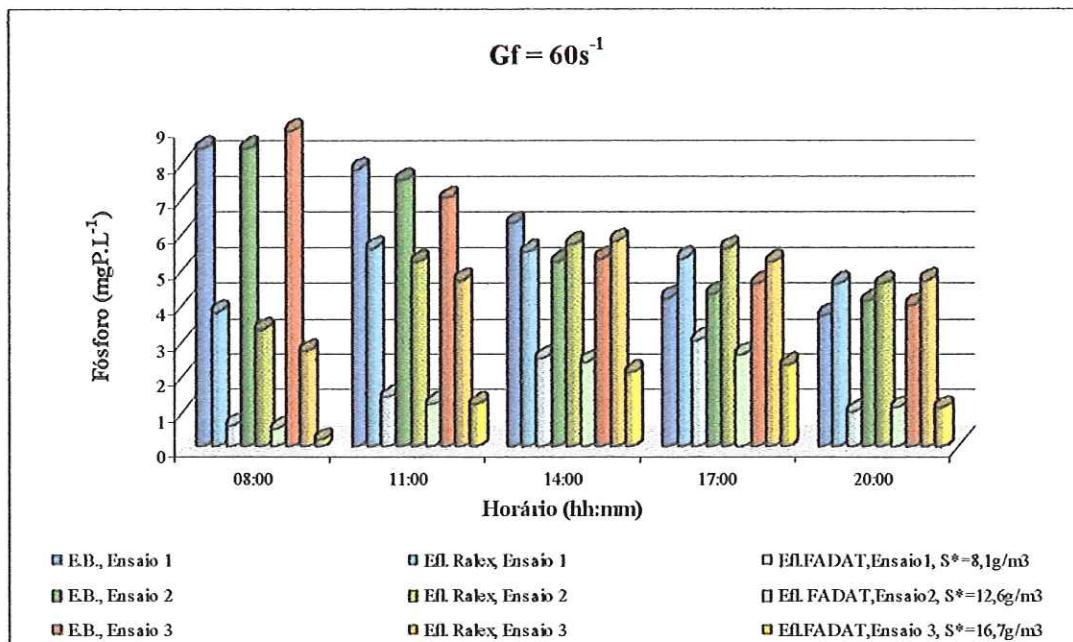
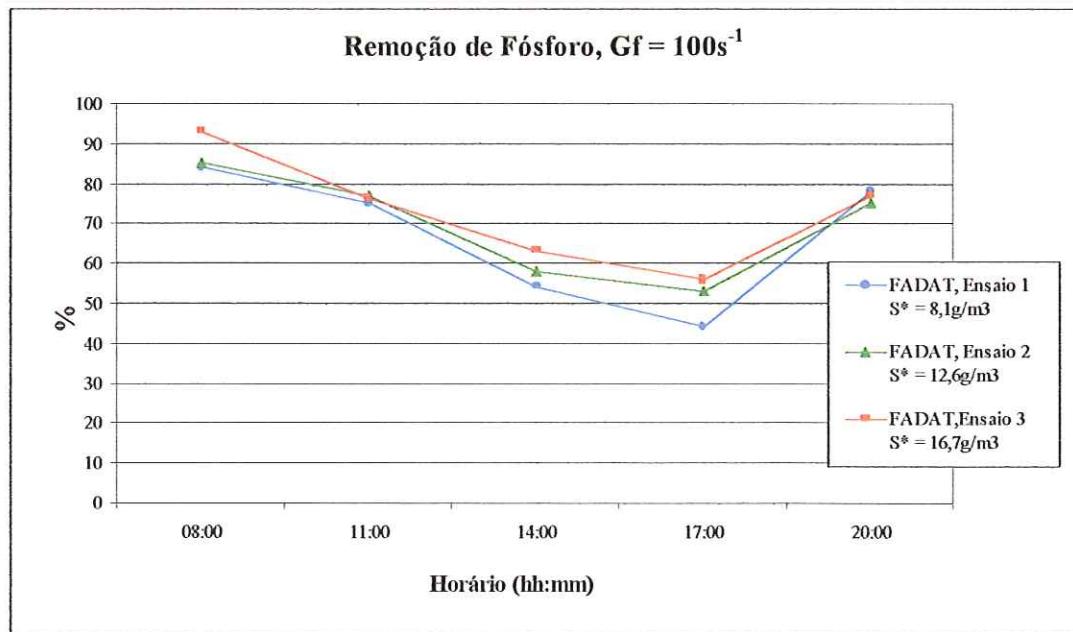


GRÁFICO 5.73 - Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT:  $T_f = 20$  min.;  $P_{sat} = 450$  kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L;  $G_f = 100\text{s}^{-1}$ ;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7\text{ g de ar/m}^3$  de efluente.



**GRÁFICO 5.74 -** Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.;  $P_{sat}$  = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.



**GRÁFICO 5.75 –** Remoção, na unidade FADAT, de fósforo presente no efluente do reator Ralex. Condições de ensaio na FADAT: Tf = 20 min.;  $P_{sat}$  = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; Gf = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

TABELA 3.9- Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: Tf = 20 min.; P<sub>sat</sub> = 450 kPa; TAS = 42 m/h; DCF = 70 mg/L; G<sub>f</sub> = 100 s<sup>-1</sup>; S\* = 8,1g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 3)

Gf=100 s <sup>-1</sup>											
Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)		
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Média ao longo das 12 h (EB)	334	247	274	253	214	185	687	514	545	6	6
Média ao longo das 12 h (Efl. Ralex)	165	165	156	100	120	89	357	234	297	5	5
Média ao longo das 12h(Efl. FADAT)	35	39	35	51	44	38	128	74	99	2	2

Eficiência de Remoção %													
		Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)		
Tempo (h)	Sistema	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
08:00	Ralex	79	66	63	85	74	73	80	79	74	55	60	70
	FADAT	92	94	96	51	86	73	77	77	90	84	85	93
	Ralex + FADAT	98	98	98	93	96	93	95	95	97	93	94	98
11:00	Ralex	42	50	42	55	50	55	36	57	52	28	31	32
	FADAT	84	92	88	33	74	75	72	77	77	75	77	76
	Ralex + FADAT	91	96	93	70	87	89	82	90	89	82	84	83
14:00	Ralex	38	25	42	58	24	51	38	58	43	13	-10	-9
	FADAT	70	70	75	39	59	51	61	69	53	54	58	63
	Ralex + FADAT	81	78	85	75	68	76	76	87	73	60	54	60
17:00	Ralex	36	7	39	39	23	36	24	35	19	-27	-31	-14
	FADAT	73	65	68	60	56	56	54	65	63	44	53	56
	Ralex + FADAT	82	68	81	76	66	72	65	77	70	29	39	50
20:00	Ralex	38	7	28	42	34	42	24	38	32	-24	-12	-16
	FADAT	82	74	69	58	54	43	64	60	64	78	75	77
	Ralex + FADAT	89	75	78	75	70	67	72	75	76	73	72	73
Média ao longo das 12 h (Ralex)		47	31	43	56	41	51	41	53	44	9	8	13
Média ao longo das 12 h (FADAT)		80	79	79	48	66	60	65	70	70	67	70	73
Média ao longo das 12h(Ralex+FADAT)		88	83	87	78	78	79	78	85	81	67	69	73

### **5.4.3 Resultados dos ensaios com variação da quantidade de ar fornecida ao processo sem adição cloreto férrico**

Na Tabela 3.10, apresentam-se os resultados referentes ao ensaio em que foi avaliado o desempenho da unidade FADAT sem adição de cloreto férrico. Foi utilizada taxa de aplicação superficial de 21 m/h associada a valores de quantidade de ar fornecida para a flotação de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 1; 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 2 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente no ensaio 3.

Nos três ensaios realizados nessa fase da pesquisa tanto o esgoto bruto quanto o efluente do reator anaeróbio apresentaram características físico-químicas bastante semelhante, com pequenas variações nos valores médios de turbidez, SST, DQO e fósforo de um ensaio para outro.

Verifica-se, através da análise da Tabela 3.10 e dos Gráficos 5.76 a 5.83, que os valores investigados de quantidade de ar (8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente), forneceram resultados bastante semelhantes, sendo que o fornecimento de 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente proporcionaram a maior eficiência média de remoção de turbidez na unidade FADAT (22%) com residual entre 80,6 e 140 uT e entre 64,4 e 135 uT, respectivamente. No que concerne a remoção de sólidos suspensos (SST), verifica-se que a maior média de remoção foi alcançada com 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente, proporcionando na unidade FADAT remoção de 58%, com valores residuais na faixa de 30 a 52 mg/L de SST. Em relação à remoção de DQO na unidade FADAT, observa-se que o emprego de 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente forneceu a melhor média de eficiência de remoção (39% com residual de 90 a 236 mgO<sub>2</sub>/L). A maior remoção média de fósforo observada na unidade piloto foi de 14% (P residual entre 3,1 e 5,0 mg/L) com aplicação de 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.

O desempenho da unidade piloto FADAT nos três ensaios realizados ao longo das 12 h de operação (8h às 20h) foi bastante semelhante, apresentando na média valores próximos de turbidez, SST, DQO e fósforo no efluente. Foram observados os seguintes intervalos de remoções médias: entre 19 e 22% de Turbidez, entre 46 e 58% de SST, entre 26 e 39% de DQO e entre 11 e 14% de fósforo.

Considerando a eficiência global do sistema de tratamento Ralex-FADAT sem aplicação de coagulante, observa-se que os três valores de quantidade de ar

fornecido para a flotação (8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente) apresentaram eficiências de remoção bastante semelhantes para turbidez, SST e DQO. O mesmo apresentou para a melhor condição de S\* as seguintes eficiências médias de remoção ao longo de 12 h de operação: 59% de turbidez, 80% de SST, 67% de DDQ e 21% de fósforo.

De maneira geral as eficiências de remoção dos diversos parâmetros, observadas com a operação da instalação piloto FADAT sem aplicação de cloreto férrico como coagulante, apresentaram-se bastante reduzidas, o que permite inferir que, nessas condições talvez não tenham sido produzidos flocos com hidrofobicidade e distribuição de tamanhos de partículas adequados ao processo de flotação por ar dissolvido.

Dessa maneira, vale ressaltar, conforme já mencionado no item 3.4, a importância da adição de coagulante à água residuária com objetivo de promover a desestabilização das partículas coloidais e a formação de flocos adequados ao processo de flotação por ar dissolvido.

Conclui-se que o processo de coagulação/flocação com vistas a flotação aumenta de maneira significativa a eficiência do sistema de tratamento Ralex-FADAT.

---

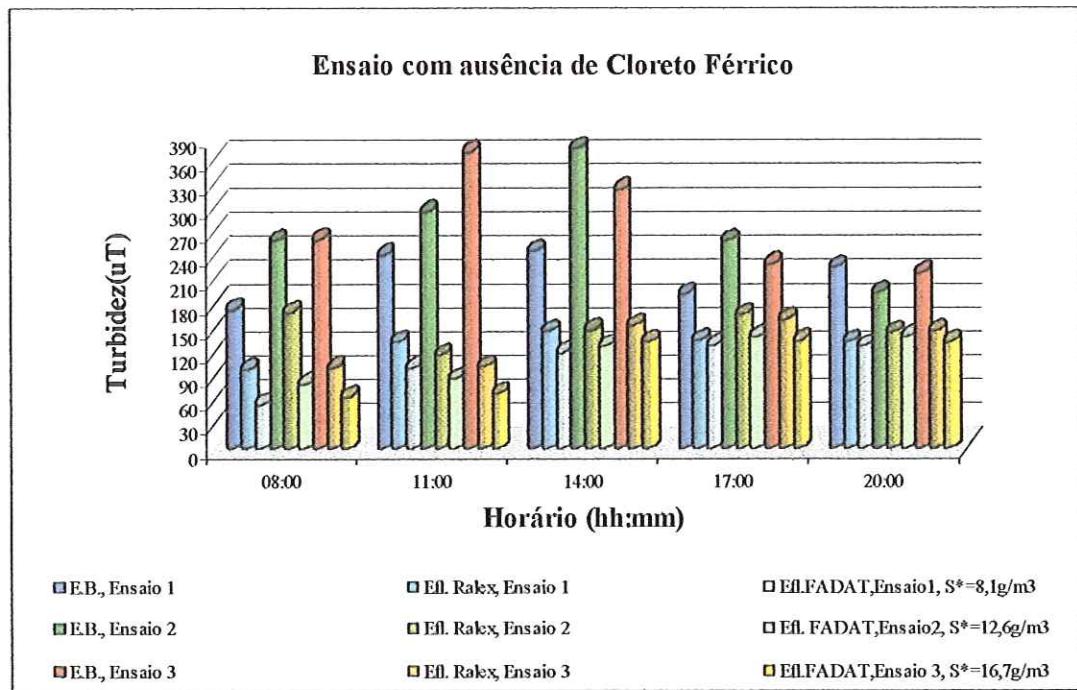


GRÁFICO 5.76 - Resultados de turbidez do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Ausência de Cloreto Férrico,  $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 21 m/h;  $S^* = 8,1; 12,6 \text{ e } 16,7 \text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

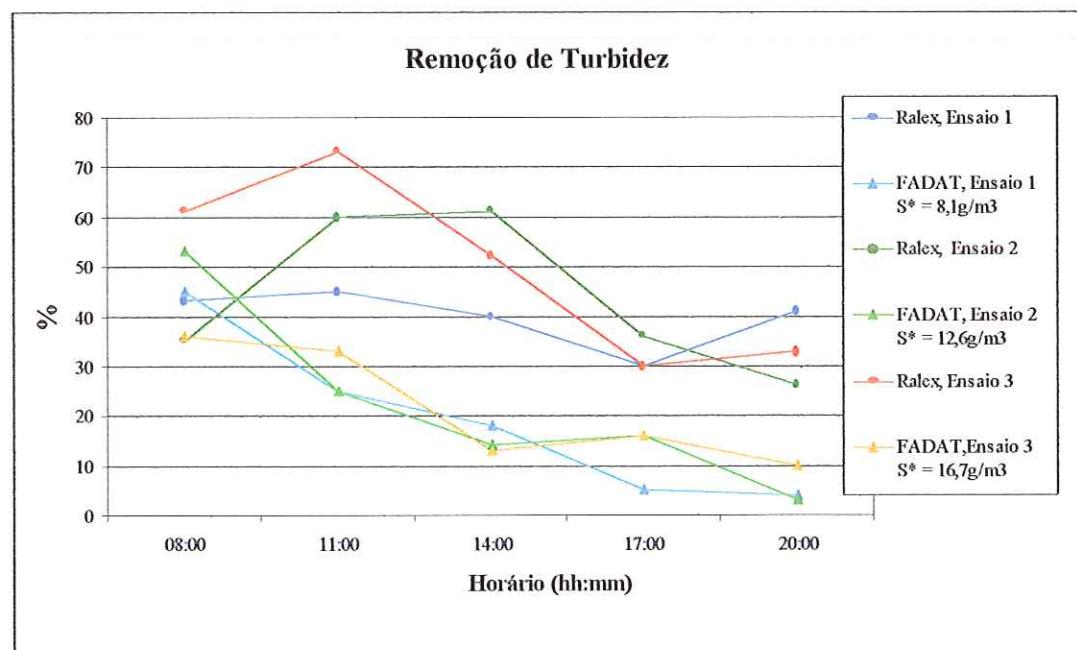


GRÁFICO 5.77 - Remoção de turbidez no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Ausência de Cloreto Férrico,  $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 21 m/h;  $S^* = 8,1; 12,6 \text{ e } 16,7 \text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

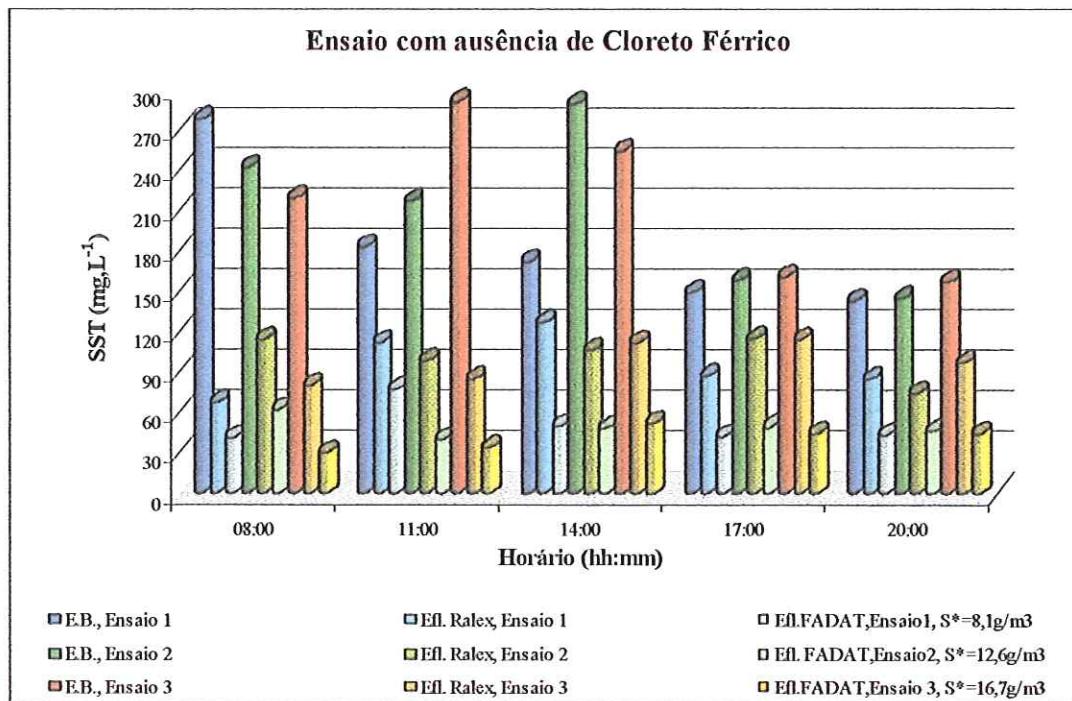


GRÁFICO 5.78 - SST presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Ausência de Cloreto Férrico,  $P_{\text{sat}} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 21 m/h;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7 \text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

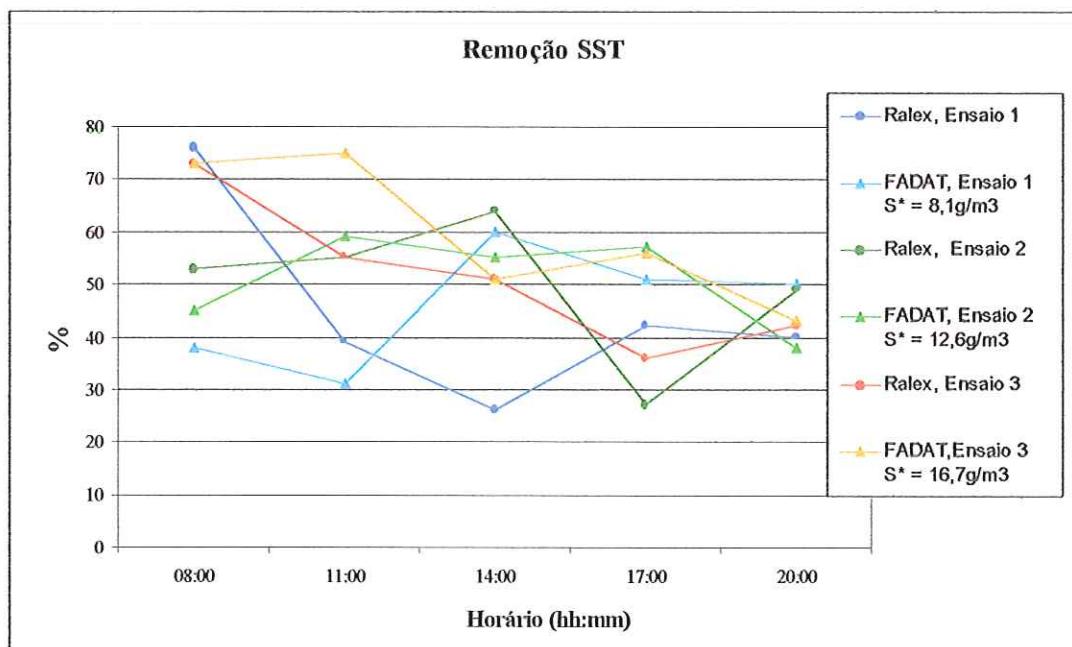
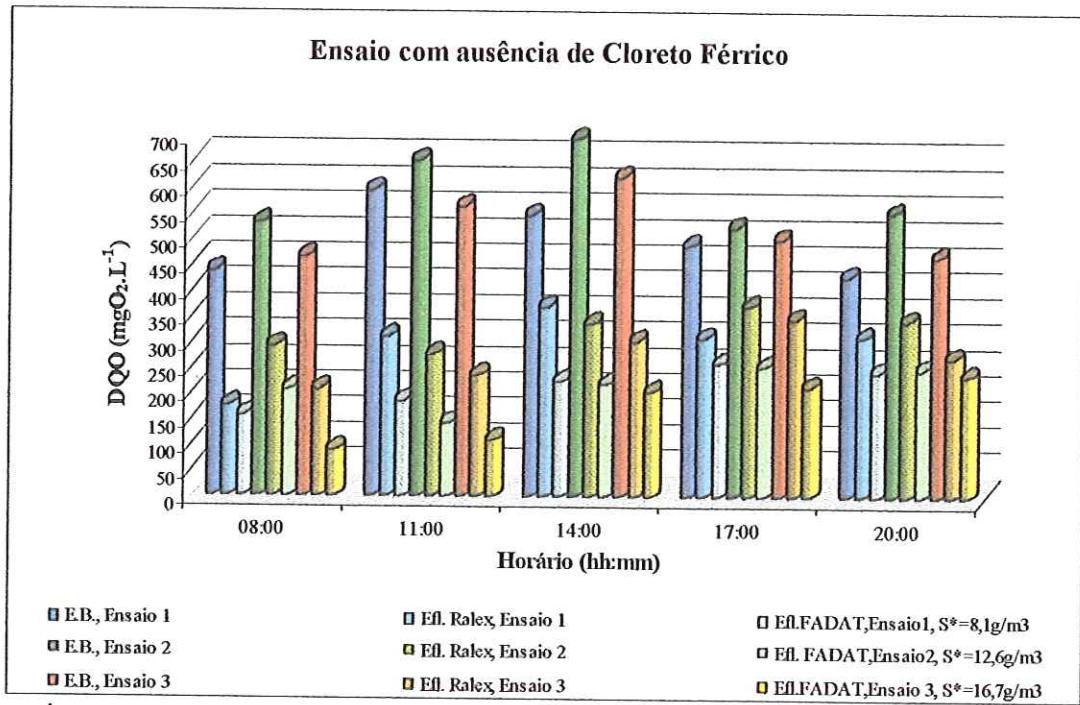
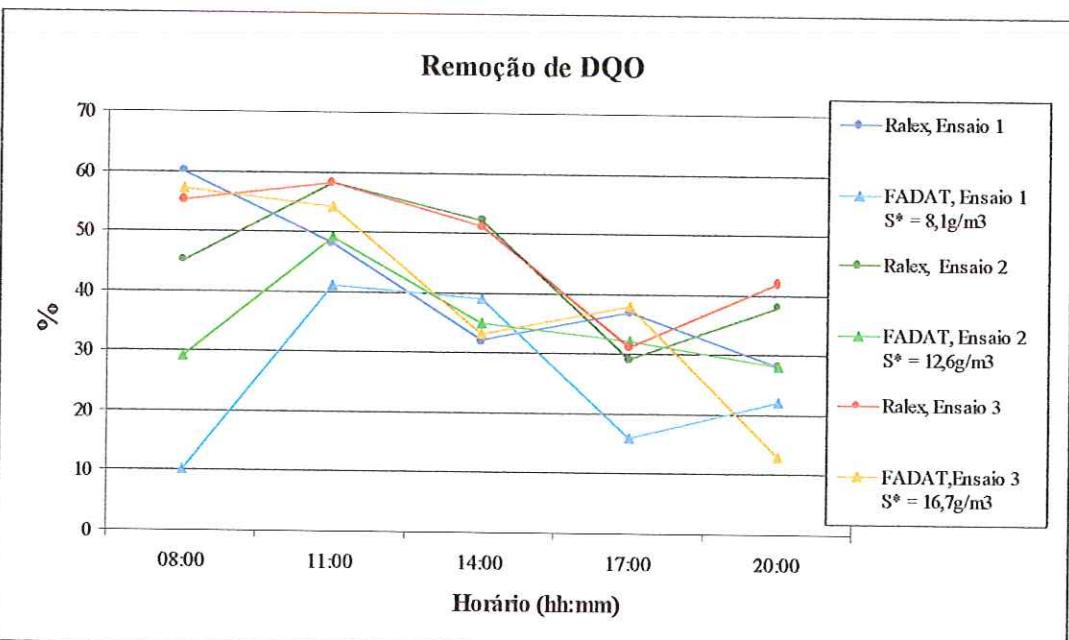


GRÁFICO 5.79 - Remoção de SST no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Ausência de Cloreto Férrico,  $P_{\text{sat}} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 21 m/h;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7 \text{ g de ar/m}^3$  de efluente.



**GRÁFICO 5.80 - Resultados de DQO do esgoto bruto (EB), do efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e do efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Ausência de Cloreto Férrico,  $P_{sat} = 450$  kPa; TAS = 21 m/h;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.**



**GRÁFICO 5.81 - Remoção de DQO no reator Ralex e na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio na FADAT: Ausência de Cloreto Férrico,  $P_{sat} = 450$  kPa; TAS = 21 m/h;  $S^* = 8,1; 12,6$  e  $16,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de efluente.**

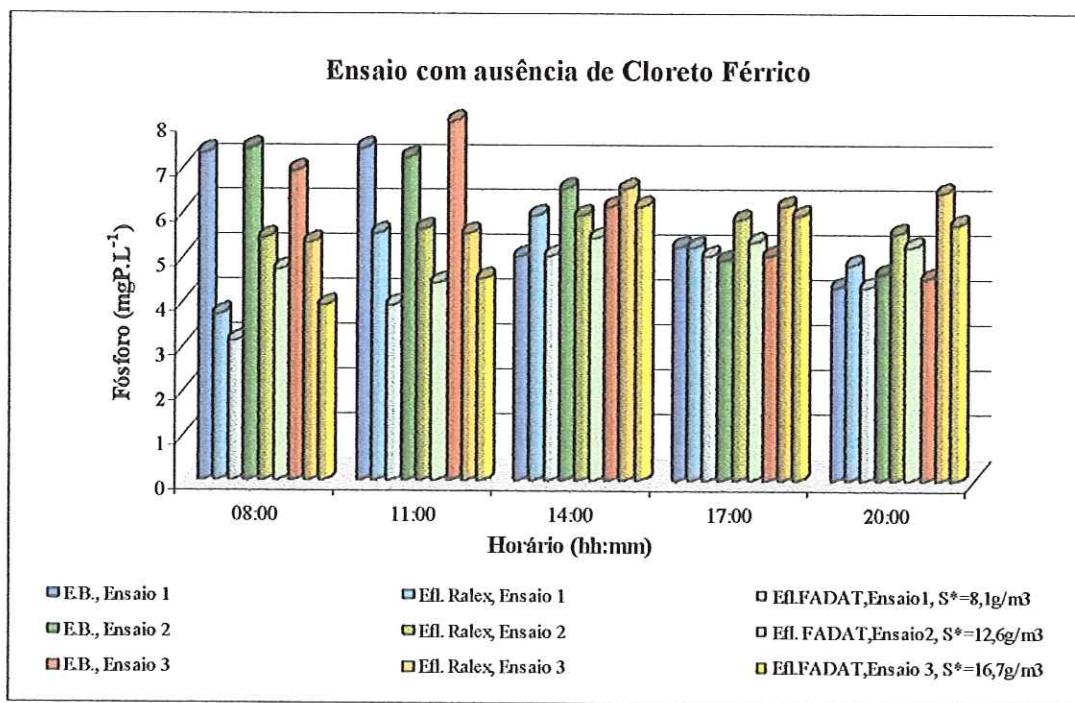


GRÁFICO 5.82 - Resultados de fósforo presente no esgoto bruto (EB), no efluente do reator Ralex (Efl. Ralex) e no efluente da unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Ausência de Cloreto Férrico,  $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 21 m/h;  $S^* = 8,1; 12,6 \text{ e } 16,7 \text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

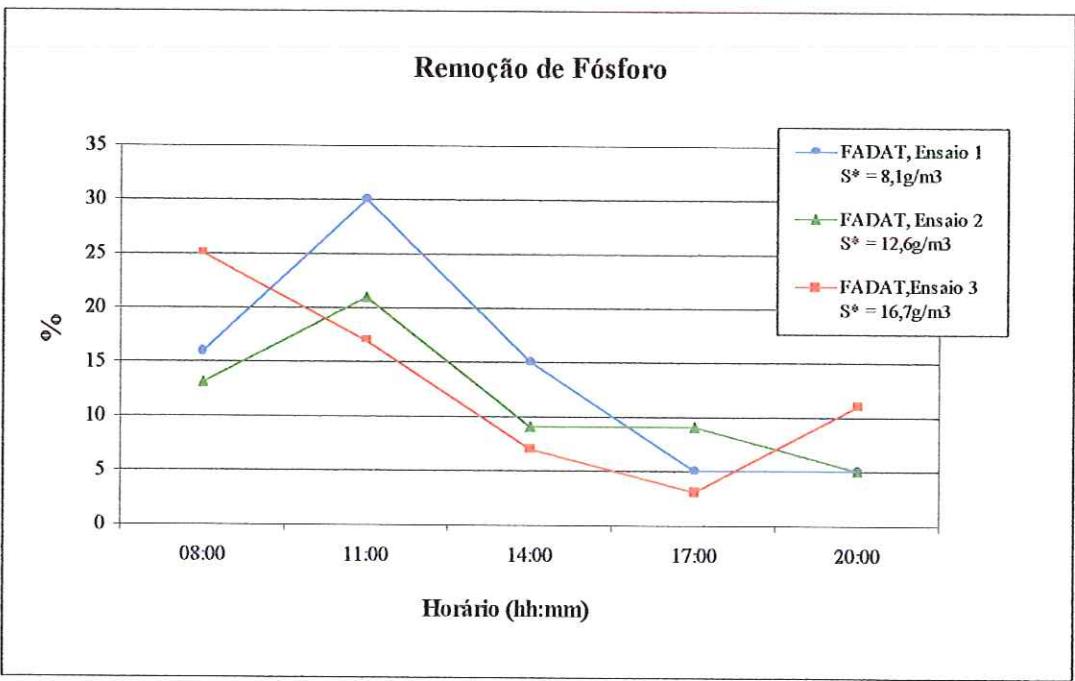


GRÁFICO 5.83 - Remoção de fósforo na unidade piloto FADAT (Efl. FADAT). Condições de ensaio na FADAT: Ausência de Cloreto Férrico,  $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ ; TAS = 21 m/h;  $S^* = 8,1; 12,6 \text{ e } 16,7 \text{ g de ar/m}^3$  de efluente.

TABELA 3.10- Resultados referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio: Ausência de cloreto férrico;  $P_{sat} = 450$  kPa; TAS = 21 m/h;  $S^* = 8,1\text{g de ar/m}^3$  de efluente (ensaio 1); 12,6 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 2) e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente (ensaio 3)

	Ensaios com ausência de Cloreto Férrico											
	Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> .l <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Média ao longo das 12 h (EB)	217	277	281	185	210	216	500	592	525	6	6	6
Média ao longo das 12 h (Efl. Ralex)	130	149	133	95	101	98	295	324	273	5	6	6
Média ao longo das 12h(Efl. FADAT)	107	115	107	51	49	41	214	214	171	4	5	5

Tempo (h)	Sistema	Eficiência de Remoção %											
		Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO mgO <sub>2</sub> .l <sup>-1</sup>			Fósforo (mgP/L)		
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
08:00	Ralex	43	35	61	76	53	63	60	45	55	49	27	23
	FADAT	45	53	36	38	45	63	10	29	57	16	13	25
	Ralex + FADAT	68	69	75	85	74	86	64	61	81	57	36	43
11:00	Ralex	45	60	73	39	55	71	48	58	58	26	22	32
	FADAT	25	25	33	31	59	60	41	49	54	30	21	17
	Ralex + FADAT	58	70	81	58	82	88	69	78	81	48	39	43
14:00	Ralex	40	61	52	26	64	56	32	52	51	-18	9	-8
	FADAT	18	14	13	60	55	53	39	35	33	15	9	7
	Ralex + FADAT	51	66	59	71	83	79	59	69	67	0	17	0
17:00	Ralex	30	36	30	42	27	29	37	29	31	0	-18	-21
	FADAT	5	16	16	51	57	61	16	32	38	5	9	3
	Ralex + FADAT	33	46	42	72	69	72	47	52	57	4	-8	-17
20:00	Ralex	41	26	33	40	49	38	28	38	42	-11	-20	-41
	FADAT	4	3	10	50	38	55	22	28	13	5	5	11
	Ralex + FADAT	44	28	40	70	68	72	43	55	50	-5	-14	-26
Média ao longo das 12 h (Ralex)		40	43	50	45	50	51	41	44	48	9	4	-3
Média ao longo das 12 h (FADAT)		19	22	22	46	51	58	26	34	39	14	11	13
Média ao longo das 12h(Ralex+FADAT)		51	56	59	71	75	80	57	63	67	21	14	9

#### 5.4.4 Comparação dos resultados dos ensaios realizados com a unidade de flotação por ar dissolvido FADAT

A Tabela 3.11 apresenta as eficiências médias de remoção de DQO, turbidez, SST, e fósforo observadas nos ensaios realizados utilizando a unidade piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa (FADAT) ao longo de 12h de operação.

Os resultados apresentados se referem aos ensaios realizados em que se mantiveram fixos o tempo de flocação ( $T_f$ ) de 20 minutos e a pressão de saturação ( $P_{sat}$ ) de 450 kPa. Foram testadas duas diferentes taxas de aplicação superficial (21 m/h e 42 m/h), duas dosagens de cloreto férreo (50mg/L e 70 mg/L), inicialmente três ( $60\text{ s}^{-1}$ ,  $80\text{ s}^{-1}$  e  $100\text{ s}^{-1}$ ) e depois dois ( $80\text{ s}^{-1}$  e  $100\text{ s}^{-1}$ ) valores de gradiente médio de velocidade de flocação, através da variação de quantidades de ar fornecidas para a flotação ( $S^*$ ) de 8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente. Para esses mesmos valores de quantidade de ar fornecida para flotação, também foi realizado ensaios sem adição de cloreto férreo, utilizando taxa de aplicação superficial de 21 m/h.

Analisando-se a Tabela 3.11, verifica-se que:

- i) - Dentre os valores de gradiente médio de velocidade de flocação ( $G_f$ ) estudados, os valores de  $80\text{ s}^{-1}$  e  $100\text{ s}^{-1}$  apresentaram resultados semelhantes, sendo que o  $G_f$  de  $80\text{ s}^{-1}$  forneceu, nas melhores condições, resultados ligeiramente superiores que os de  $100\text{ s}^{-1}$ , embora próximos. Utilizando-se  $G_f$  de  $80\text{ s}^{-1}$  os melhores resultados de eficiência média de remoção foram, na unidade FADAT: 73 % de DQO, 84%turbidez, 67% de SST e 75% de fósforo (ver valores em destaque) e no sistema de tratamento Ralex-FADAT: 88% de DQO, 90% de turbidez, 88% de SST e 76% de fósforo. Utilizando-se  $G_f$  de  $100\text{ s}^{-1}$  os melhores resultados de eficiência média de remoção foram, na unidade FADAT: 72 % de DQO, 86% de turbidez, 63% de SST e 65% de fósforo e no sistema de tratamento Ralex-FADAT: 84 % de DQO, 89%turbidez, 85% de SST e 73% de fósforo.

- ii) – Para as dosagens de cloreto férrico aplicadas (0, 50 e 70 mg/L), a DCF de 70 mg/L forneceu os melhores resultados de remoção dos parâmetros analisados, apresentando nas melhores condições, as seguintes eficiências médias de remoção observadas na unidade FADAT: 73 % de DQO, 86% de turbidez, 67% de SST e 75% de fósforo e no sistema de tratamento Ralex-FADAT: 88% de DQO, 90% de turbidez, 88% de SST e 76% de fósforo.
- iii) Os valores investigados de quantidade de ar (8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente), forneceram, nas melhores condições, resultados semelhantes, sendo que a quantidade 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente proporcionou eficiência de remoção ligeiramente superior. Nssas condições foram observadas as seguintes remoções na unidade piloto FADAT: 73 % de DQO, 86% de turbidez, 67% de SST e 75% de fósforo e no sistema global de tratamento Ralex-FADAT: 88% de DQO, 90% de turbidez, 88% de SST e 76% de fósforo
- iv) Comparando os melhores resultados obtidos para cada um dos dois valores de taxa de aplicação superficial investigados (21 e 42 m/h), a unidade de flotação FADAT forneceu resultados bastante semelhantes. A operação da unidade FADAT com taxa de aplicação superficial de 21m/h exigiu menor quantidade de ar para a flotação (8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente), entretanto, quando operada com 42 m/h a unidade FADAT exigiu aumento da fração de ar fornecida para a flotação.

A respeito da eficiência de sistemas convencionais de flotação por ar dissolvido (FAD) no pós-tratamento de efluentes de reator anaeróbio pode-se citar PENETRA *et al* (1999), que investigou a variação da fração de recirculação do efluente pressurizado a 450 kPa e concluiu que a aplicação de quantidades de ar dissolvido na faixa de 16 a 19 g de ar/m<sup>3</sup> de esgoto permitiu a obtenção de eficiências de remoção de 95% de SST, 85% DQO e 95% de fosfato total. REALI *et*

*al* (2001 b), que utilizando fração de recirculação (*R*) de 20% em volume ( $S^*$  19 g de ar/m<sup>3</sup>) na pressão de saturação (*Psat*) de  $450 \pm 10$  kPa, obteve nos ensaios em que foram aplicadas dosagens de 30 mg/L de cloreto férrico associada a 1,0 mg/L de polímeros, eficiência de remoção de turbidez em torno de 97% e de fosfato total entre 86% a 93%, sendo que as maiores eficiências de remoção de DQO foram obtidas com os polímeros catiônico e não iônico (73% a 78%). PENETRA (2002), que utilizando 50 mg/L de cloreto férrico, 18% de recirculação,  $450 \pm 10$  kPa de pressão de saturação, taxa de aplicação superficial de 180 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia, obteve nas melhores condições os seguintes resultados: 94,4 % de remoção de DQO (com residual de 53 mg/L), 87% de remoção de fósforo (com residual de 0,8 mgP/L), 96,7% de remoção de sólidos suspensos totais (residual de 9mg/L de SST) e 96,4% de turbidez (com residual de 12,9 uT), quando o efluente do reator anaeróbio apresentou qualidade ruim durante todo o ensaio.

Comparando o emprego da unidade piloto FADAT como pós-tratamento de efluentes de reator anaeróbio com os trabalhos anteriormente citados em que foram utilizados sistemas convencionais de flotação por ar dissolvido (FAD), pode-se dizer que, de maneira geral, os resultados obtidos com a operação da instalação piloto FADAT foram satisfatórios, levando-se em conta que o desempenho do reator anaeróbio Ralex durante a realização dos ensaios se encontrava consideravelmente abaixo daquele apresentado pelo mesmo reator em estudos anteriores, realizados por PEREIRA (2000).

Conforme pode ser constatado, a unidade FADAT é capaz de operar com taxas de até 42 m/h requerendo menores quantidades de ar dissolvido para a flotação que a flotação convencional, proporcionando dessa maneira economia de energia.

TABELA 3.11 - Eficiências médias de remoção de DQO, turbidez, SST e fósforo referentes aos ensaios realizados na unidade piloto FADAT. Condições de ensaio:  $P_{sat} = 450$  kPa e  $T_f = 20$  min. nos ensaios com adição de cloreto férrico

S*	Sistema	DCF = 50 mg/L					DCF = 70 mg/L					Sem coagulante	
		Taxa = 21 m/h			Taxa = 42 m/h		Taxa = 21 m/h			Taxa = 42 m/h			
		Gf = 60 s <sup>-1</sup>	Gf = 80 s <sup>-1</sup>	Gf = 100 s <sup>-1</sup>	Gf = 80 s <sup>-1</sup>	Gf = 100 s <sup>-1</sup>	Gf = 80 s <sup>-1</sup>	Gf = 100 s <sup>-1</sup>	Gf = 80 s <sup>-1</sup>	Gf = 100 s <sup>-1</sup>	Taxa = 21 m/h		
DQO	Ralex	21	52	55	55	50	49	44	45	41	41		
	FADAT	47	66	76	50	52	73	72	63	65	26		
	Ralex + FADAT	57	82	88	76	75	84	81	78	78	57		
	Ralex	17	53	53	48	44	54	51	47	53	44		
	FADAT	54	59	62	54	56	73	71	71	70	34		
	Ralex + FADAT	58	80	80	76	75	87	84	84	85	63		
	Ralex	49	72	54	46	49	59	55	44	44	48		
	FADAT	52	43	65	58	53	72	63	61	70	39		
	Ralex + FADAT	73	83	82	76	75	88	83	77	81	67		
Turbidez	Ralex	41	47	34	47	47	40	30	39	47	40		
	FADAT	61	76	83	68	64	84	86	71	80	19		
	Ralex + FADAT	75	85	88	82	80	89	89	81	88	51		
	Ralex	26	41	48	42	48	47	46	41	31	43		
	FADAT	69	69	68	66	63	82	77	75	79	22		
	Ralex + FADAT	74	80	81	80	80	90	86	84	83	56		
	Ralex	44	73	27	46	43	44	54	45	43	50		
	FADAT	65	49	77	63	62	82	72	74	79	22		
	Ralex + FADAT	78	84	81	77	76	90	87	84	87	59		
SST	Ralex	36	50	38	52	56	32	33	51	56	45		
	FADAT	56	64	66	40	60	67	63	53	48	46		
	Ralex + FADAT	72	81	78	70	82	74	75	77	78	71		
	Ralex	27	52	53	33	56	51	50	53	41	50		
	FADAT	63	48	48	47	38	60	63	57	66	51		
	Ralex + FADAT	69	75	75	65	71	80	81	79	78	75		
	Ralex	40	58	33	47	42	62	64	46	51	51		
	FADAT	49	59	68	51	55	66	57	54	60	58		
	Ralex + FADAT	65	81	76	73	73	88	85	75	79	80		
Fósforo	Ralex	18	11	20	11	19	6	20	11	9	9		
	FADAT	33	60	47	37	35	75	62	57	67	14		
	Ralex + FADAT	43	60	56	43	46	74	69	57	67	21		
	Ralex	1	4	5	10	10	12	18	16	8	4		
	FADAT	27	36	42	39	40	62	65	61	70	11		
	Ralex + FADAT	25	34	41	41	41	64	69	63	69	14		
	Ralex	6	22	7	7	4	15	15	13	13	-3		
	FADAT	44	36	41	42	45	74	63	61	73	13		
	Ralex + FADAT	38	44	39	41	40	76	62	61	73	9		

## 6 Conclusões

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

- O sistema de tratamento seqüencial de esgoto sanitário, constituído de reator anaeróbio (Ralex) seguido de unidade de flotação de alta taxa (FADAT), apresentou bons resultados em relação à remoção de turbidez, DQO, fósforo e sólidos suspensos, apesar da baixa eficiência do tratamento promovido pelo reator Ralex durante a realização dos ensaios.
- Em nenhum ensaio foi constatado acúmulo nocivo de flocos nas superfícies das placas que constituem o módulo de alta taxa.
- As boas condições de operação do sistema de coagulação/flocação do efluente do reator anaeróbio e a aplicação de dosagens adequadas de coagulante (cloreto-férrego) promovem considerável melhora no desempenho da subseqüente flotação.
- Os valores de gradiente médio de velocidade de flocação de  $80\text{ s}^{-1}$  e  $100\text{ s}^{-1}$  proporcionam resultados similares entre si e melhores que aqueles obtidos com  $60\text{ s}^{-1}$ , no que se refere as eficiências de remoção de turbidez, DQO, fósforo e SST, indicando que gradientes de flocação situados nessa faixa de valores sejam mais adequados para o pós-tratamento de esgoto sanitário, utilizando o processo de flotação por ar dissolvido de alta taxa.
- Para dosagem de cloreto férrego igual a  $70\text{ mg/L}$  o significativo aumento na taxa de aplicação superficial, de  $21\text{m/h}$  para  $42\text{m/h}$ , não comprometeu a eficiência do sistema de tratamento, apesar de exigir maior quantidade de ar para a flotação.

- Dentre o conjunto de condições operacionais da unidade piloto FADAT estudada, foi considerado o mais vantajoso: taxa de aplicação superficial no flotador de 21m/h, dosagem de cloreto férrico de 70 mg/L, gradiente médio de velocidade de flocação de 80 s<sup>-1</sup> e 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente. Nessas condições foram obtidas as seguintes remoções: 84% de turbidez (residual entre 6,3 e 62 uT), 73% de DQO (residual entre 20 e 156 mgO<sub>2</sub>/L), 75% de fósforo (residual entre 0,5 e 1,9 mgP/L) e 67% de SST (residual entre 8 e 80 mg/L de SST).
- Nas melhores condições de operação da unidade FADAT os três valores investigados de quantidade de ar fornecida para a flotação (8,1; 12,6 e 16,7 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente), promoveram eficiências próximas, indicando que o fornecimento de maior quantidade de ar não proporcionou aumento significativo na eficiência do processo. Portanto o emprego da unidade FADAT como pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio proporciona economia de energia, tendo em vista requererem de 75 a 50% da quantidade de ar exigida pelos sistemas de flotação convencional.
- Os resultados demonstram que o sistema envolvendo o emprego de reatores anaeróbios seguido de unidade de flotação por ar dissolvido de alta taxa constitui alternativa bastante atraente, capaz de promover elevado grau de tratamento de esgotos sanitários.

## 7 Sugestões

As seguintes sugestões são apresentadas para futuros estudos com a unidade de flotação por ar dissolvido (FADAT):

- Estudo de aplicação de taxa de flotação superior a 42 m/h com vistas a determinar o comportamento da unidade FADAT para taxas mais elevadas.
- Variação de quantidades de ar fornecido para a flotação menores que 8,1 g de ar/m<sup>3</sup> de efluente
- Variação do tempo de floculação, maiores e menores que 20 minutos, com vistas a determinar o valor mais adequado ao tratamento.
- Estudo da variação da dosagem de cloreto férrico aplicado ao longo do dia.

## 8- Referências Bibliográficas

- AGUILAR, M. I., SÁEZ, J., LLORÉNS, M., SOLER, A., ORTUÑO, J.F. (2001). *Nutrient Removal and Sludge production in the Coagulation-flocculation Process.* Water Research.
- ALÉM SOBRINHO, P. et al. (2002) Avaliação do Sistema Reator Ralf e Flotação por Ar Dissolvido no Tratamento de Esgoto Sanitário. *Rev. Sanare, Revista Técnica da Sanepar*, Curitiba, v. 17, n. 17, p.49-58, jan/jun. 2002.
- AMERICAN WATER ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20 .ed. Washington: APHA. 1998.
- BERNARD, C.; HERVIOU, P.; POUJOL, T. (1995). Stormwater treatment by dissolved air flotation: first results from a pilot project. *Water Science & Technology*, vol. 32, nº 1, pp. 137-143.
- BRATBY, A. (1982). Treatment of Raw Wastewater Overflows by Dissolved Air Flotation. *Journal WPCF*, 54, 1558.
- CAMPOS, J. R. et. al. (1996). Tratamento Físico-Químico por Flotação de Efluentes de Reatores Anaeróbios. *Trabajo apresentado no XXV Congreso Interamericano Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, México.
- CARVALHO, M.E. de (2000). *Avaliação da Dosagem de Cloreto Férrico Associado a Polímero Catiônico no Pós-Tratamento Físico-Químico por Flotação de Efluentes de Reator Anaeróbio de Leito Expandido (RALEX).* Projeto de iniciação científica financiado pelo Programa de Saneamento Básico/CNPq/FINEP/Tema2/Edital(Processo número 1014/98).
- 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. 199 p, Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- EDZWALD, J. et. al. (1992). Flocculation and Air Requirements for Dissolved Air Flotation. *Journal AWWA, march*, 1992.
- ESTEVES, F. A. (1988). *Fundamentos de limnologia*. Rio de Janeiro, ed. Interciência Ltda. Cap. 13 e 14, p.197-236: Nitrogênio e Fósforo.
- JOHNSON, P. N. & AMIRTHARAJAH, A. (1983). Ferric Chloride and Alum as Single and Dual Coagulants . *Journal AWWA, may*, 1983.

KIURU, H. (2000). *Development of DAF Technology from the 1<sup>st</sup> Generation to the Newest or 3<sup>rd</sup> One (Air Bubble/ Sludge bed Flotation) with High Flow-Rates (Turbulent Flow Conditions)*. The 4<sup>th</sup> International Conference Flotation in Water and Waste Water Treatment, Helsinki, Finland, September 2000.

LAWRENCE A S., AND MACKINNEY, ROSS E. (1969). Phosphate Removal By a Lime-Biological Treatment Scheme .Journal WPCF. *Journal WPCF*, v.41, n.7,pp. 1259-1275.)

LUNDGREN, H. (1970). Recent Advences in Air Flotation Technology. *Tappi Journal*, v.53, n.2, pp. 287-89

MARCHETO, M. (1996). *Estudo de uma unidade de Flotação por Ar Dissolvido com Escoamento Horizontal entre Placas Aplicada ao Tratamento de Água de Abastecimento*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MORSE, G.K., BRENT, S. W., GUY, J. A., LESTER, J. N. (1998). Review: Phosphorus Removal and Recovery Technologies. *Sci Total Environ (1998)*, 212, 69-81.

NESBITT, J. B. (1969). Phosphorus Removal – The State of the Art. *Journal WPCF*, v.41, n.5,pp. 701-13

ODEGAARD, H. (1979). Chemical Floc Formation in Wastewater Treatment - An Introduction. *Prog. Wat. Tech.*, Supl. 1, p. 103-110, Pergamon Press.

ODEGAARD, H. (1995). Optmization of flocculation/flotation in chemical wastewater treatment - *Wat.Sci Tech.*, 31. (3-4), 73-82.

PATRIZZI, L. J. (2002). Remoção de ferro, manganês e substâncias húmicas de água para abastecimento utilizando unidade de flotação por ar dissolvido de alta taxa. São Carlos, 1998. 227 p. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC-USP).

PENETRA, R.G. (1998). Pós-tratamento fisico-químico por flotação de efluentes de reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB). São Carlos, 1998. 140 p. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC-USP).

PENETRA, R.G.; REALI, M. A. P.; FORESTI, E. & CAMPOS, J. R. (1999). Post-Treatment of Effluents from Anaerobic Reactor Treating Domestic Sewage by Dissolved- Ar Flotation. *Wat. Sci. Tech.*, 40, n 8, pp. 137-43

PENETRA, R.G.; REALI, M. A. P.; & CAMPOS, J. R. (1999). Iinfluência da quantidade de ar fornecida no pós-tratamento por flotação de efluentes de reatores

anaeróbios UASB. XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – ABES 99, Rio de Janeiro.

PENETRA, R.G.; REALI, M.A.P. & CAMPOS, J.R. (2002). Influence of flocculation conditions in the performance of an experimental domestic sewage treatment plant consisting of an anaerobic expanded bed reactor followed by dissolved air flotation. In: VII Latinamerican Workshop-Seminar on Anaerobic Digestion. Mérida, Yucatán, México. 22 a 25 de outubro.

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. *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 Ingenieria Sanitaria Y Ambiental, 23, La Habana, Cuba, 1992. Amais. V.2, parte 1, La Habana, Cuba, AIDS. P. 283-296.

REALI, M. A. P.; MARCHETO, M. (1996). *Unidade de Flotação por Ar Dissolvido com Escoamento Horizontal entre Placas Aplicada ao Tratamento de Água de Abastecimento.* XXV Congresso Interamericano Ingenieria Sanitaria Y Ambiental – AIDS 96, Novembro de 1996, México, D.F.

REALI, M. A. P.; SANTOS, S. P. (1996). Emprego de uma Unidade de Flotação de Alta Taxa com Escoamento Vertical para Remoção de Algas de Águas para Abastecimento. *Engenharia e Arquitetura – Caderno de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.1, n.1, pp.37-45.

REALI, M. A. P.; PENETRA, R.G. & CAMPOS, J. R. (1998). Influência da Floculação na Flotação de Efluentes de Reatores Anaeróbios (UASB). *XXVI Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria Y Ambiental – AIDIS 98*, Novembro de 1998, Lima, Peru.

REALI, M. A. P., CAMPOS, J. R.. & PENETRA, R.G. (2001 a). Sewage Treatment by Anaerobic Biological Process Associated with Dissolved Air Flotation. *Water Science & Technology*, 43(08), 91-98.

REALI, M.A.P., PENETRA, R.G., CARVALHO, M.E. de (2001 b). Flotation Technique with Coagulant and Polymer Application applied to the post-treatment of effluents from anaerobic reactor treating sewage. *Water Science & Technology*, 44(04), 213-219.

REALI, M. A. P.; MARCHETO, M. (2000). High rate DAF unit applied for water treatment. In: The 4<sup>th</sup> International Conference: Flotation in Water and Waste Water Treatment, 2000, Helsinki. **The 4<sup>th</sup> International Conference: Flotation in Water and Waste Water Treatment – Conference Proceedings.** Helsinki: International Water Association – IWA, 2000, v.1, p.1-9.

SUUTARINEM, O. (2000), *Turbulent Flotation*. The 4<sup>th</sup> International Conference: Flotation in Water and Waste Water Treatment, Helsinki, Finland, September 2000.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. (1994) Anaerobic Sewage Treatment: A Practical Guide for Regions with a Hot Climate. John Wiley & Sons, Chichester, England, 1994.

WEAVER, P. J. (1969). Phosphate in Surface Waters and Detergents. Journal WPCF. *Journal WPCF*, v.41, n.9, pp. 1647-1653).