

**EMPREGO DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO  
NO PRÉ-TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS  
DE UMA INDÚSTRIA CÍTRICA**



**GUILHERME AMORIM BRAGA**

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 Antônio Penalva Reali**

**DEDALUS - Acervo - EESC**



**31100017451**

São Carlos

1998

Class.	TESE
Cult.	0945
Tombo	T0127/98

31100014451

st 0979292

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

B813e Braga, Guilherme Amorim  
Emprego da flotação por ar dissolvido no pré-  
tratamento de efluentes líquidos de uma  
indústria cítrica / Guilherme Amorim Braga. --  
São Carlos, 1998.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos-Universidade de São  
Paulo, 1998.

Área: Hidráulica e Saneamento.

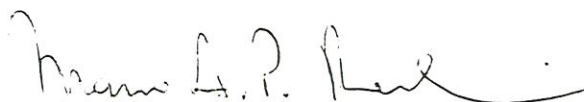
Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio Penalva  
Reali.

1. Flotação. 2. Flotação por ar dissolvido.  
3. Efluentes de indústria cítrica. 4. Tratamento  
de águas residuárias. 5. Aproveitamento de  
sólidos. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **GUILHERME AMORIM BRAGA**

Dissertação defendida e aprovada em 18-03-1998  
pela Comissão Julgadora:



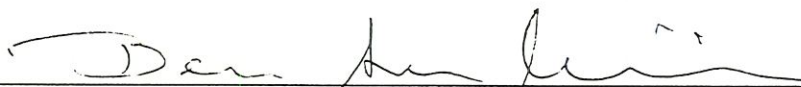
---

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



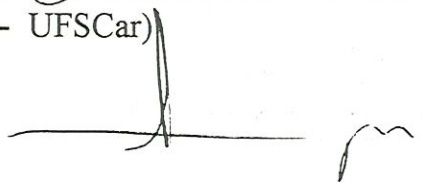
---

Prof. Titular **JOSÉ ROBERTO CAMPOS**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Doutor **BERNARDO ARANTES DO NASCIMENTO TEIXEIRA**  
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)



---

Prof. Titular **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**  
Coordenador da Área de Hidráulica e Saneamento



---

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

À todas as pessoas que me  
ajudaram a alcançar este objetivo,  
em especial à minha família.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Marco Antônio Penalva Reali, pela amizade, orientação e pela compreensão.

Ao Professor Roberaldo Carvalho de Souza, pesquisador da Universidade Federal de Alagoas, pelo imenso incentivo.

Ao CNPq, pela bolsa concedida.

À Citrosuco Paulista, pela concessão de suas dependências e por ter financiado o projeto.

Ao Sr. Wilson Aguiar, que viabilizou o trabalho na Citrosuco, dando todo o apoio possível necessário.

Aos técnicos do laboratório de análises físico-químicas da Fábrica II - setor de águas industriais, pela preciosa ajuda.

Ao Prof. Carlos Eduardo Blundi, pela orientação nas análises nutricionais do lodo.

Às colegas Flávia e Valdith pela amizade e ajuda nas análises nutricionais do lodo, realizadas no Laboratório do Departamento de Hidráulica e Saneamento.

Aos amigos Schilaci, Wálter, Werner, Gustavo, Fernando e Solange, pela gratificante convivência e amizade.

À Adriana, pelo imenso incentivo, pela superação e compreensão da minha ausência.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABELAS .....	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	viii
RESUMO .....	x
ABSTRACT .....	xi
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 OBJETIVO .....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1 Panorama da Indústria Cítrica no Brasil .....	4
3.2 O processo industrial empregado na Citrosuco Paulista (Matão-SP) .....	9
3.2.1 Recebimento e armazenagem (silagem) .....	9
3.2.2 Lavagem e seleção .....	9
3.2.3 Extração do suco .....	10
3.2.4 Produção de suco concentrado congelado .....	10
3.2.5 Produção de óleo essencial .....	11
3.2.6 Produção de pellets para ração de gado bovino e álcool .....	12
3.3 Características das águas residuárias da Indústria Cítrica .....	13
3.4 Sistema de tratamento atualmente existente na Citrosuco .....	15
3.5 Importância da Coagulação/Floculação dos efluentes líquidos precedendo	

ao processo de flotação por ar dissolvido .....	16
3.6 O processo de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) .....	17
3.6.1 O processo de geração de bolhas .....	18
3.6.2 Fatores que influenciam no tipo de bolha formada .....	21
3.6.3 Fatores que influenciam o processo de FAD .....	24
3.7 Projeto de sistema de FAD .....	30
3.7.1 Projeto de sistema de FAD para clarificação .....	31
3.7.2 Projeto de sistema de FAD para espessamento .....	31
3.8 Aproveitamento do lodo ou de substâncias nutritivas presentes em indústrias alimentícias em geral .....	34
4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	40
4.1 Considerações iniciais .....	40
4.2 Caracterização dos resíduos .....	40
4.3 Estudos preliminares com unidade de FAD em escala de laboratório ...	41
4.4 Ensaio realizados com unidade piloto de FAD .....	44
4.4.1 Considerações iniciais .....	44
4.4.2 Ensaio realizados com a câmara de saturação .....	45
4.4.3 Ensaio realizados com a unidade piloto com escoamento contínuo ....	46
4.5 Monitoramento dos ensaios .....	50
4.5.1 Determinações físico-químicas .....	50
4.5.2 Determinações de Proteínas, Carboidratos e Lipídeos .....	51
5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	52
5.1 Considerações iniciais .....	52
5.2 Caracterização dos efluentes estudados .....	52
5.3 Ensaio realizados com o Flotateste .....	55
5.4 Ensaio realizados com a câmara de saturação da unidade piloto de FAD	61
5.5 Ensaio realizados com a unidade piloto de FAD .....	64
5.5.1 Considerações iniciais .....	64
5.5.2 Ensaio realizados com a instalação piloto sem aplicação de cloreto fêrrico (Ensaio nº 1 a 12) .....	65

5.5.3 Ensaio realizado na instalação piloto com aplicação cloreto férico .....	84
5.6 Determinações realizadas com amostras de lodo coletado na unidade de flotação .....	92
5.6.1 Determinação do teor de sólidos no lodo flotado .....	92
5.6.2 Composição da fração orgânica do lodo seco .....	92
5.7 Comparação entre os ensaios com e sem aplicação de cloreto férrico .....	94
5.8 Estimativa da redução de sólidos e economia no custo operacional no tratamento caso a flotação por ar dissolvido seja implantada .....	95
6 CONCLUSÕES .....	98
7 RECOMENDAÇÕES .....	100
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	102



## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Fluxograma da geração de suco de laranja na Citrosuco Paulista (Matão-SP) .....	13
Figura 02 - Perfil de escoamento ao longo de um bocal .....	22
Figura 03 - Forças de superfície envolvidas na adesão de bolhas e partículas .	25
Figura 04 - Tensão de adesão teórica versus tensão de superfície para soluções de agentes tensoativos .....	26
Figura 05 - Esquema do equipamento de Flotateste .....	42
Figura 06 - Foto do flotateste em funcionamento .....	42
Figura 07 - Esquema da unidade piloto de FAD .....	48
Figura 08 - Foto da unidade piloto de FAD .....	49
Figura 09 - Hidrograma da água amarela representando a carga sólida do dia 11/09/94 na Citrosuco Paulista (Matão) .....	53
Figura 10 - Influência do pH de coagulação na eficiência de remoção de SST por flotação, para dosagem de Cloreto Férrico igual a 0 mg/l ....	56
Figura 11 - Influência do pH de coagulação na eficiência de remoção de SST por flotação, para dosagem de Cloreto Férrico igual a 10 mg/l ....	57
Figura 12 - Influência do pH de coagulação na eficiência de remoção de SST por flotação, para dosagem de Cloreto Férrico igual a 20 mg/l ....	58

Figura 13 - Influência do pH de coagulação na eficiência de remoção de SST por flotação, para dosagem de Cloreto Férrico igual a 30 mg/l ....	58
Figura 14 - Influência do pH de coagulação na eficiência de remoção de SST por flotação, para dosagem de Cloreto Férrico igual a 40 mg/l ....	59
Figura 15 - Influência do pH de coagulação na eficiência de remoção de SST por flotação, para dosagem de Cloreto Férrico igual a 50 mg/l ....	60
Figura 16 - Influência do pH de coagulação na eficiência de remoção de SST por flotação, para dosagem de Cloreto Férrico igual a 100 mg/l ..	50
Figura 17 - Variação de ar seco fornecido pela câmara de saturação, Sp, em função da TAScs aplicadas na pressão de 4,5 Kg/cm <sup>2</sup> constante ..	62
Figura 18 - Variação de ar seco fornecido pela câmara de saturação, Sp, em função da pressão na câmara de saturação .....	62
Figura 19 - Eficiência na remoção de SST (%) em função do tempo para a TAS de 120 m/d, sem adição de cloreto férrico .....	66
Figura 20 - Resultados obtidos no Ensaio 1 em termos de SST, A/S, remoção de SST e pH (TAS = 120m/d e 40% de recirculação) .....	69
Figura 21 - Resultados obtidos no Ensaio 2 em termos de SST, A/S, remoção de SST e pH (TAS = 120m/d e 63% de recirculação) .....	70
Figura 22 - Resultados obtidos no Ensaio 3 em termos de SST, A/S, remoção de SST e pH (TAS = 120m/d e 96% de recirculação) .....	71
Figura 23 - Resultados obtidos no Ensaio 4 em termos de SST, A/S, remoção de SST e pH (TAS = 120m/d e 145% de recirculação) .....	72
Figura 24 - Eficiência na remoção de SST (%) em função do tempo para a TAS de 160 m/d .....	73

Figura 25 - Eficiência na remoção de SST (%) em função do tempo para a TAS de 200 m/d .....	74
Figura 26 - Resultados obtidos no Ensaio 5 em termos de SST, A/S, remoção de SST e pH (TAS = 160m/d e 39% de recirculação) .....	75
Figura 27 - Resultados obtidos no Ensaio 6 em termos de SST, A/S, remoção de SST e pH (TAS = 160m/d e 61% de recirculação) .....	76
Figura 28 - Resultados obtidos no Ensaio 7 em termos de SST, A/S, remoção de SST e pH (TAS = 160m/d e 87% de recirculação) .....	77
Figura 29 - Resultados obtidos no Ensaio 8 em termos de SST, A/S, remoção de SST e pH (TAS = 160m/d e 139% de recirculação) .....	78
Figura 30 - Resultados obtidos no Ensaio 9 em termos de SST, A/S, remoção de SST e pH (TAS = 200m/d e 34% de recirculação) .....	80
Figura 31 - Resultados obtidos no Ensaio 10 em termos de SST, A/S, remoção de SST e pH (TAS = 200m/d e 55% de recirculação) .....	81
Figura 32 - Resultados obtidos no Ensaio 11 em termos de SST, A/S, remoção de SST e pH (TAS = 200m/d e 84% de recirculação) .....	82
Figura 33 - Resultados obtidos no Ensaio 12 em termos de SST, A/S, remoção de SST e pH (TAS = 200m/d e 126% de recirculação) .....	83
Figura 34 - Foto do Ensaio 12 (TAS = 200 m/d, Rec. = 56% e 56,8% de remoção), realizado em 08/12/94, o colapso do ensaio devido a turbulência .....	85
Figura 35 - Resultados obtidos no Ensaio 13 em termos de SST, A/S, remoção de SST e pH (TAS = 160m/d, 39% de recirculação e dosagem de Cloreto Férrico = 100 mg/l) .....	87

Figura 36 - Resultados obtidos no Ensaio 14 em termos de SST, A/S, remoção de SST e pH (TAS = 160m/d, 39% de recirculação e dosagem de Cloreto Férrico = 50 mg/l) .....	88
Figura 37 - Resultados obtidos no Ensaio 15 em termos de SST, A/S, remoção de SST e pH (TAS = 200m/d, 26% de recirculação e dosagem de Cloreto Férrico = 50 mg/l) .....	89
Figura 38 - Resultados obtidos no Ensaio 16 em termos de SST, A/S, remoção de SST e pH (TAS = 200m/d, 15% de recirculação e dosagem de Cloreto Férrico = 50 mg/l) .....	90
Figura 39 - Foto de amostras retiradas na entrada e saída da unidade piloto de FAD no Ensaio 16, realizado em 17/08/95, mostrando a eficiência no uso de cloreto férrico e os aspectos visuais das amostras .....	91
Figura 40 - Foto mostrando aspecto de água pré-tratada na unidade piloto de FAD no Ensaio 16, realizado em 17/08/95, mostrando a eficiência do uso de cloreto férrico .....	91
Figura 41 - Foto tirada durante o Ensaio 9, no dia 06/12/94, mostrando o aspecto do lodo flotado firme e espesso, como na maioria dos ensaios .....	94
Figura 42 - Resultados obtidos com a instalação piloto de FAD em termos de eficiência na remoção de SST (%) em função do tempo para a TAS de 160 m/d e 200 m/d, com aplicação de cloreto férrico (Ensaio 13 a 16) .....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Exportações brasileiras de suco de laranja, em mil toneladas e US\$ mil .....	5
Tabela 02 - Área colhida de laranja - em mil hectares .....	8
Tabela 03 - Evolução na produção de laranja - em milhões de caixas .....	8
Tabela 04 - Características físico-químicas finais dos efluentes da Cargil Industrial - (1980) .....	15
Tabela 05 - Valores das constantes de flotação para vários dejetos .....	33
Tabela 06 - Composição de quatro lipídeos simples no lodo de laticínio .....	36
Tabela 07 - Dados da unidade de flotação do abatedouro e os resultados do pré-tratamento .....	38
Tabela 08 - Composição bruta de sólidos recuperados dos efluentes da Indústria Gear Meat Co. ....	38
Tabela 09 - Composição típica de lodo ativado processado e seco .....	39
Tabela 10 - Algumas caracterização físico-química da água amarela e da água preta - Citrosuco Paulista (Matão-SP) - 1995 .....	53
Tabela 11 - Resumo dos resultados dos ensaios realizados com o flotateste ...	55
Tabela 12 - Resultados dos ensaios realizados com a câmara de saturação ....	63
Tabela 13 - Resumo dos Ensaiois realizados com a unidade Piloto de FAD ...	67

Tabela 14 - Remoção de Sulfatos e Sulfetos nos ensaios realizados com cloreto Férrico .....	84
Tabela 15 - Quantidade de proteínas, carboidratos e lipídeos provenientes da unidade piloto de FAD por grama de lodo seco .....	92

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABECITRUS	- Associação Brasileira dos Exportadores de Cítricos
B.F.P	- Óleo de Baixo Ponto de Fulgor
BRIX	- Escala Hidrométrica Arbitrária para expressar a gravidade específica de líquidos, especialmente soluções de açúcares
FAD	- Flotação por Ar Dissolvido
FAI	- Flotação por Ar Induzido
GATT	- Acordo Geral sobre Tarifas e Comércio
IEA	- Instituto de Economia Agrícola da Secretaria de Agricultura do Estado de São Paulo
SHS	- Departamento de Hidráulica e Saneamento
TAS	- Taxa de Aplicação Superficial
UASB	- Reator anaeróbio de manta de lodo
USP	- Universidade de São Paulo

## LISTA DE SÍMBOLOS

A/S	- Razão entre a massa de Ar e a massa de Sólidos
C <sub>s</sub>	- Concentração de saturação de um gás na água, g .m <sup>-3</sup>
C <sub>F</sub>	- Concentração do lodo flotado, mg .l <sup>-1</sup>
C <sub>0</sub>	- Concentração de Sólidos no afluente, mg .l <sup>-1</sup>
DBO <sub>5</sub>	- Demanda Bioquímica de Oxigênio (5 dias), mg .l <sup>-1</sup>
DBO <sub>7</sub>	- Demanda Bioquímica de Oxigênio (7 dias), mg .l <sup>-1</sup>
DQO	- Demanda Química de Oxigênio, mg .l <sup>-1</sup>
f	- Fração do ar dissolvido na pressão P
h	- Espessura do lodo flotado acima do nível da água, m
h'	- Espessura do lodo flotado abaixo do nível da água, m
kh	- Coeficiente de Henry, g . m <sup>-3</sup> . Pa <sup>-1</sup>
k <sub>n</sub> (n = 1, .. , 8)	- Constantes para um tipo particular, n, de lodo ou afluente
P	- Pressão parcial do Gás, Pa
P	- Pressão, Pa
pH	- Potencial Hidrogeniônico
P <sub>0</sub>	- Pressão antes do orifício, Pa
P <sub>k</sub>	- Pressão depois do orifício, Pa
P <sub>v</sub>	- Pressão de vapor da água na temperatura do ensaio (mm Hg)
Q <sub>0</sub>	- Vazão Afluente de água residuária, l .s <sup>-1</sup>
Q <sub>T</sub>	- Vazão Total, l .s <sup>-1</sup>
Q <sub>s</sub>	- Carga Sólida, Kg .m <sup>-2</sup> . d <sup>-1</sup>
R	- Vazão de Recirculação, l .s <sup>-1</sup>
sa	- Solubilidade do Ar, ml .l <sup>-1</sup>
S <sub>p</sub>	- Concentração de ar seco por litro de água, mg.l <sup>-1</sup>



SST	- Sólidos Suspensos Totais, $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$
TAS	- Taxa de Aplicação Superficial, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ou $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$
TAS <sub>CS</sub>	- Taxa de Aplicação Superficial na câmara de saturação, $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$
T	- Temperatura, °C
$v_0$	- velocidade da água antes do orifício, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$v_k$	- velocidade da água depois do orifício, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$\rho$	- massa específica da água, $\text{kg} \cdot \text{l}^{-3}$
$\phi$	- Ângulo de Contato
$\gamma_{LG}$	- Tensão Superficial do Líquido
$\gamma_{SG}$	- Tensão Superficial do Sólido
$\gamma_{SL}$	- Tensão Interfacial entre o Líquido e o Sólido
$\Gamma_{SG}$ , $\Gamma_{SL}$ e $\Gamma_{LG}$	- Quantidade de agentes tensoativos adsorvidos em cada interface

## RESUMO

BRAGA, G. A. Emprego da flotação por ar dissolvido no pré-tratamento de efluentes líquidos de uma indústria cítrica. São Carlos, 1998. 104p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O desempenho do tratamento de efluentes líquidos existente na indústria Citrosuco Paulista SA (suco de laranja), em Matão/SP, encontra-se prejudicada pela excessiva presença de Sólidos Suspensos nos efluentes produzidos (águas amarela e preta), principalmente no sistema de lagoas. Foi investigada a possibilidade do uso da Flotação por Ar Dissolvido (FAD) como pré-tratamento dessas águas combinadas, visando a remoção da maior parte dos sólidos em suspensão e utilização do lodo gerado nas unidades de flotação como matéria-prima para fabricação de ração animal através de sua mistura ao bagaço normalmente aproveitado pela indústria para tal finalidade. Os experimentos foram realizados na indústria Citrosuco, em equipamento de FAD em escala de laboratório e piloto. Os resultados mostraram que, apesar das repentinas mudanças de qualidade das águas verificadas durante os ensaios, o uso da FAD aliada ao uso do cloreto férrico como coagulante, resultou em remoções de Sólidos Suspensos Totais de até 97,6%, produzindo um lodo firme, espesso e contendo % de proteínas, carboidratos e lipídeos para a fabricação de ração animal.

Palavras-chave: Flotação, Flotação por Ar Dissolvido (FAD), efluentes da Indústria Cítrica, tratamento de águas residuárias e aproveitamento de sólidos.

## ABSTRACT

BRAGA, G. A. The use of Dissolved-Air Flotation in a citric industry wastewater treatment. São Carlos, 1998. 104p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The performance of the Citrosuco Paulista SA industry (orange juice) existing wastewater's treatment plant is prejudiced by the excessive presence of Suspended Solids in the effluents (called black and yellow waters), mainly in the lagoons system. It was investigated the possibility of the use of Dissolved-Air Flotation (DAF) as a treatment of these combined waters, to reduce the suspended solids concentration, and to use the floated sludge as animal feed. The experiments were carried out in the Citrosuco industry, in laboratory and pilot-scale units of DAF. The results showed that, although sudden changes on waters quality during the essays happened, the use of DAF together with Ferric Chloride as coagulant, resulted in removal of suspended solids up to 97,6%, producing a firm, thick sludge and suitable as a source of protein, carbohydrate and lipids for animal feed.

Keywords: Flotation, Dissolved-Air Flotation (DAF), Citrus fruit Industry effluents, wastewater treatment and solids utilization.

## 1. INTRODUÇÃO

O problema de proteção dos recursos hídricos contra a contaminação por efluentes municipais e industriais tem adquirido ultimamente grande importância para a sociedade. A consciência de que os recursos são escassos, mais do que a obrigação em atingir determinados padrões de emissão, deveria ser a principal idéia do industrial, produtor não só de bens de consumo, mas também de efluentes potencialmente prejudiciais ao meio ambiente.

Neste sentido, existem algumas estratégias aliadas a novas técnicas de tratamento, que possibilitam não só a melhoria da qualidade final do efluente líquido, como também a recuperação de parte da matéria orgânica presente na água residuária. O aproveitamento de material útil presente nas águas residuárias diminui o custo do tratamento, podendo muitas vezes resultar em ganhos significativos para a empresa. Uma das indústrias que pode se beneficiar deste tipo de proposta é a indústria cítrica que se apresenta em plena expansão.

Nos últimos anos a produção de laranja cresceu significativamente, destacando-se o Estado de São Paulo não só como maior produtor do país, como também o dono do maior parque industrial no processamento das frutas. O crescimento da citrocultura, da industrialização de frutas cítricas e das exportações tem proporcionado enormes benefícios sociais e econômicos para o país devido a geração de empregos diretos e indiretos, necessários para manter o complexo agro-industrial, e pela geração de divisas para o Brasil resultantes das exportações.

Entretanto, a obtenção destes benefícios apresenta custo relativamente alto, pois a evolução da industrialização de frutas cítricas resultou no aumento progressivo do volume de águas residuárias provenientes de sua atividade. Esses efluentes líquidos muitas vezes são descartados sem tratamento adequado, provocando impactos ambientais das mais variadas formas, principalmente aos

recursos hídricos receptores que não são capazes de assimilar o elevado teor de matéria orgânica usualmente contido nos efluentes líquidos dessas indústrias.

Uma dessas indústrias, a Citrosuco Paulista, unidade de Matão-SP, investiu em pesquisa com o intuito de verificar a possibilidade de implantação da técnica da flotação por ar dissolvido (FAD) como pré-tratamento de seus efluentes líquidos. Deve-se salientar, que essa indústria há anos estabeleceu convênio com o Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, através do qual foram desenvolvidos diversos trabalhos de Pesquisa na área de tratamento de águas residuárias.

A técnica da FAD é baseada na separação de partículas sólidas e/ou líquidas de uma fase líquida, através da utilização de bolhas de gás, normalmente o ar, que aderindo à superfície das partículas, aumentam o seu empuxo, provocando assim a ascensão das mesmas em direção à superfície, onde são devidamente coletadas após atingirem uma determinada concentração. A flotação apresenta uma série de vantagens, entre elas destacam-se: (1) é composta por unidades compactas, com baixo tempo de detenção hidráulica e pequena área em planta; (2) promove a presença de ar dissolvido em grande quantidade, evitando-se anaerobiose e possibilidade de maus odores; (3) rapidez de entrada em regime e versatilidade de operação de unidades de flotação com recirculação pressurizada; (4) a grande eficiência na remoção de substâncias oleosas (hidrofóbicas) porventura presentes na água residuária.

## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivos:

- Construir, operar e avaliar a eficiência de uma instalação piloto de coagulação, floculação e flotação por ar dissolvido empregada no pré-tratamento de dois tipos de efluente líquido da indústria cítrica Citrosuco Paulista S/A, comumente designados como: "água amarela" e "água preta".

- Efetuar avaliação nutricional preliminar do lodo gerado na unidade piloto de flotação com vistas ao possível emprego na alimentação animal.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1- Panorama da Indústria Cítrica no Brasil

Segundo FURTADO (1994), “para os próximos anos , até a virada do século, o complexo citrícula brasileiro projeta um cenário de muita competição no mercado internacional de suco de laranja. Os preços, em queda nos últimos tempos (o valor médio da tonelada do suco exportada pelo Brasil caiu de 1540 dólares em 1989/90 para 657 dólares em 1992/93), deverão permanecer estáveis, em patamares baixos. Há uma corrida para colocar ordem na casa, após a grande festa da década de 80, animada pelo ritmo das geadas na Flórida, Estado norte-americano dono do segundo maior laranjal do planeta. Mesmo na época, vários analistas do setor e a indústria alertavam para o crescimento da capacidade de absorção dos mercados. Na prática foi impossível conter a expansão dos mercados no Brasil. Os preços oferecidos pela caixa da laranja eram um estimulante irresistível. Mas os citricultores norte-americanos tomaram providências para ficarem menos expostos aos efeitos das geadas, deslocando plantios, por exemplo, e a produção voltou a crescer. Geadas sempre poderão ocorrer, mas os estragos eventuais já não podem entrar como um fator de peso nos cálculos dos estrategistas brasileiros”.

O ajuste que está em curso, porém, não autoriza expectativas pessimistas. Afinal o Brasil é dono de 74% das exportações mundiais, que andam pela casa de 1,2 milhão de toneladas anuais.

"Todo o trabalho conduzido hoje no interior do complexo citrícula nos leva a crer que o Brasil continuará a ser um supridor confiável de suco, capaz de atender ao mercado mundial. Se fizermos as coisas certas, não tenho dúvidas que os grandes países consumidores ficarão conosco" (AMARO<sup>1</sup> apud FURTADO, 1994, p.

---

<sup>1</sup>AMARO, A.A. - Agrônomo, diretor do IEA (Instituto de Economia Agrícola da Secretaria de Agricultura de São Paulo) em entrevista a FURTADO (1994)

86) As análises desenvolvidas pelo IEA (Instituto de Economia Agrícola da Secretaria de Agricultura de São Paulo), segundo FURTADO (1994), já antecipavam, há tempos, o panorama observado hoje no mercado. É o caso, por exemplo, das expectativas exageradamente otimistas em relação à abertura do mercado japonês, ocorrida há dois anos.

Ao contrário do que alguns imaginavam, comenta FURTADO (1994), “os japoneses não passaram a consumir 150 mil toneladas ao ano de uma só vez. A conquista do consumidor nipônico provavelmente levará tempo e demandará maiores esforços ainda das empresas que já investiram naquela área, seja em publicidade ou em instalações portuárias para a descarga de navios graneleiros. Outros mercados com grande potencial de expansão são os da Coréia e Europa. As chances de o Brasil continuar mantendo esses territórios com êxito são grandes”. As estatísticas de exportação mostram que as empresas brasileiras têm avançado (Tabela 1). E precisam fazê-lo: as importações realizadas pelos Estados Unidos estão em declínio, embora aquele país não possa eliminar totalmente as compras realizadas no Brasil.

TABELA 1: Exportações brasileiras de suco de laranja, em mil toneladas e US\$ mil

ANO	1989/90		1990/91		1991/92		1992/93	
	VOLUME	VALOR	VOLUME	VALOR	VOLUME	VALOR	VOLUME	VALOR
<b>EUA</b>	357,5	540,8	254,4	301,9	318,3	384,0	299,0	221,9
<b>EUROPA</b>	408,8	639,4	401,7	449,6	500,5	574,8	607,6	383,7
<b>JAPÃO</b>	32,3	50,8	42,6	42,3	45,6	58,2	52,2	27,6
<b>CORÉIA</b>	16,6	26,7	24,9	24,5	43,6	53,9	31,7	21,4
<b>OUTROS</b>	77,3	117,1	67,4	71,4	51,1	62,2	54,7	32,6
<b>TOTAL</b>	892,5	1374,8	791,0	889,7	959,1	1133,1	1045,2	687,2

FONTE : IEA (Instituto de Economia Agrícola da Secretaria de Agricultura de São Paulo) apud FURTADO (1994)

Segundo AMARO<sup>1</sup> apud FURTADO (1994), “os norte-americanos acreditam poder suprir a demanda interna por volta de 1996/97, mas vão precisar de suco brasileiro para fazer "blends" (misturas) e repassá-los aos canadenses e japoneses. Isso



permitirá que os embarques de suco para os EUA permaneçam entre 150 a 200 mil toneladas por ano. Deve-se observar, porém, segundo AMARO<sup>1</sup> apud FURTADO(1994), “que os americanos operam com custos de produção elevados e vendem o suco a preços superiores aos do Brasil. Utilizam estratégias de marketing e embalagem diferenciadas. O diferencial de preços existentes não é compatível com a qualidade do suco brasileiro. Muitos citricultores da Flórida já reclamam de custos e, talvez, não poderão competir. Por isso estima-se uma redução de produção por volta do ano 2000”.

Segundo FURTADO (1994), “os EUA, por enquanto, defendem-se entrincheirados atrás de barreiras alfandegárias. Os EUA continuam a aplicar uma taxa fixa de 492 dólares por tonelada de suco brasileiro desembarcado em seus portos, qualquer que seja o preço do produto. Na Flórida há uma sobretaxa adicional de 35 dólares. Outros países importadores aplicam taxas *ad-valorem* (valor calculado sobre o preço do suco no porto de desembarque). Na Comunidade Européia a alíquota é de 19 % e, no Japão, de 30 %”. A taxa, segundo AMARO<sup>1</sup> apud FURTADO (1994), seria reduzida a partir do ano seguinte (1995), graças às negociações concluídas no âmbito do GATT (Acordo Geral sobre Tarifas e Comércio, ao final da "rodada Uruguai"). Nos EUA, por exemplo, a redução será de 15%, escalonada ao longo de seis anos. “É muito pouco. O Brasil negociou mal. Aos níveis de preços de hoje, o citricultor brasileiro perde cerca de 2 dólares por caixa de laranja. Mas a derrubada de barreiras continua a ser nosso assunto prioritário. O governo brasileiro precisa se conscientizar que nosso mercado interno é atraente. Podemos usar isso para barganhar” (GARCIA<sup>2</sup> apud FURTADO, 1994, p. 87). Essa chance o país está perdendo ao abrir incondicionalmente as importações de produtos de consumo, de olho apenas no comportamento da inflação. De todo o modo, apesar dos percalços, a indústria nacional está ajustada, operando com tecnologia de ponta. E, ao que parece, aparou antigas arestas: várias associações que representavam as indústrias decidiram se fundir na Abecitrus (Associação Brasileira dos Exportadores de Cítricos).

---

<sup>2</sup>GARCIA, A. - Presidente da Associação Brasileira dos Exportadores de Cítricos (Abecitrus) em entrevista à FURTADO (1994)

Agora, comenta AMARO<sup>1</sup> apud FURTADO (1994), “é preciso reajustar a produção de matéria-prima e também pensar no mercado interno que, embora apresente características diferentes, tem potencial. Há quatro empresas fazendo suco pasteurizado para o mercado doméstico e mais de 1500 máquinas extratoras para suco preparado à vista do consumidor espalhados pelo país. Quanto à produção, segundo AMARO<sup>1</sup> apud FURTADO (1994), “a citricultura continuará a ser um bom negócio para quem está no ramo, de preferência com propriedades bem localizadas em relação as fábricas. Implantar novos pomares é um empreendimento de risco, com retorno do investimento somente a partir de dez a doze anos, a depender da produtividade e dos preços do mercado. Há um outro fator que precisa ser levado em conta: a produção própria de laranjas pela indústria. É uma estratégia adotada pelas fábricas de garantia de suprimento”. De acordo com as estimativas de AMARO<sup>1</sup> apud FURTADO (1994), “essa parcela equivale hoje a 13 % do total processado. Deverá ser elevada, nos próximos anos, para algo entre 20 e 25 %. Trabalha-se também com o conceito de “fruta prisioneira”, ou seja, as laranjas colhidas em pomares pertencentes a familiares dos donos de empresas, diretores e outros. Trata-se da laranja cujo fornecedor é sempre bem tratado pela indústria, de quem recebe assistência técnica e os melhores preços. Hoje, o percentual de frutas próprias e “prisioneiras” é de 50 %”.

“Portanto, é necessário cautela na hora de investir, porque o mercado estreita-se e, somente no Estado de São Paulo, segundo AMARO<sup>1</sup> apud FURTADO (1994), há 40 milhões de árvores que ainda não entraram em produção”. Como resultado de todos esses fatores, principalmente dos preços baixos, a citricultura pisa no freio (a indústria tem garantido remuneração de 3,6 dólares por caixa contra o fornecimento de laranja durante três anos - média de 1,2 dólar por ano). A área colhida em São Paulo, segundo FURTADO (1994), alcançou o pico em 1991 e entrou em declínio (Tabela 2). E os canaviais avançaram sobre as áreas antes ocupadas por pomares. Estima-se que na região de Bebedouro, 50 mil hectares de laranja tenham sido erradicados. A produção, porém, deverá aumentar até alcançar a faixa de 315 a 320 milhões de caixas nos próximos anos. AMARO<sup>1</sup> apud FURTADO (1994) prever que a curto prazo haverá um processo de terceirização na citricultura.

"Calculamos que para cada lote de 15 mil plantas é necessário um conjunto de máquinas - trator, grade, roçadeira, pulverizador -, avaliado em 45 mil dólares. E como há muitos citricultores com 5 a 6 mil plantas, parece lógico que surjam empresas prestadoras de serviços para executar essas tarefas de campo, trazendo economias de escala. A produtividade também terá que crescer. Os produtores que quiserem permanecer na atividade precisarão colher no mínimo 2,5 caixas por árvore. O adensamento tem aumentado e já está, em média, na faixa de 260 plantas por hectare. Na minha opinião, deve ficar limitado a 300 ou 320 plantas, proporcionando no mínimo 750 caixas de frutos por hectare por ano" (AMARO<sup>1</sup> apud FURTADO, 1994, p. 89).

TABELA 2: Área colhida de laranja - em mil hectares

REGIÃO	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993*
SÃO PAULO	474,2	503,6	541,9	563,5	595,7	641,3	671,2	686,2	584,2	538,1
OUTRAS	157,7	158,7	165,3	163,3	164,5	184,4	187,6	195,6	201,2	214,9
BRASIL	631,9	662,3	707,2	724,8	760,2	825,7	858,8	881,8	785,4	753,0

FONTE: IEA apud FURTADO (1994) - \*Dados preliminares

TABELA 3: Evolução na produção de laranjas- em milhões de caixas

REGIÃO	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993*
SÃO PAULO	205,1	218,0	190,1	234,3	221,0	296,5	262,7	285,5	300,0	307,0
OUTRAS	48,4	49,3	51,7	50,5	53,4	60,5	54,7	58,2	61,3	67,0
BRASIL	253,5	267,3	241,8	284,8	274,4	357,0	317,4	343,7	361,3	374,0

FONTE: IEA apud FURTADO (1994) - \*Dados preliminares

### 3.2- O processo industrial empregado na Citrosuco Paulista (Matão - SP)

Segundo FIGUEIREDO (1977)<sup>3</sup> e OUNO et al. (1983)<sup>4</sup> apud LIMA (1993) o processo de fabricação de suco de laranja concentrado congelado pode ser dividido nas seguintes etapas:

#### 3.2.1- Recebimento e armazenamento (silagem)

A laranja é transportada a granel através de caminhões e/ou carretas e ao chegar na indústria é submetida a pesagem para controle da quantidade recebida.

A descarga das laranjas é realizada por gravidade em rampas hidráulicas, sendo as mesmas conduzidas por esteiras ou através de roletes até o silo de armazenamento. Durante o percurso até o silo, as laranjas passam por uma seleção manual, onde são retiradas as podres, estragadas ou manchadas e que podem, de alguma maneira, alterar a qualidade do suco. São descartadas também as laranjas com diâmetro inferior a 50 milímetros, devido a dimensão das extratoras de suco. Todos esses rejeitos são enviados para a fábrica de "pellets" (base para ração).

O silo é constituído por unidades ou células feitas de madeira. No interior dessas unidades existem rampas de proteção que evitam o choque mecânico entre as frutas e asseguram a sua integridade. Essas estruturas fazem com que não ocorra o rompimento das bolsas de óleo que formam o flavelo, camada mais externa da fruta cítrica e, conseqüentemente, a perda do subproduto. A silagem tem ainda a finalidade de separar e uniformizar a matéria prima, além de regularizar o fornecimento de frutas para o processo industrial.

#### 3.2.2- Lavagem e seleção

A limpeza da fruta se processa logo após a silagem. As frutas, por gravidade, saem do silo e seguem por roletes com escovas, onde ocorre a lavagem, constituída por uma série de pulverizações, dividida em duas etapas: a primeira, com água condensada oriunda dos evaporadores de suco; a segunda, com a água clorada.

---

<sup>3</sup>FIGUEIREDO, R. F. *Tratamento biológico de águas residuárias da industrialização de frutas cítricas*. São Carlos - SP, 1977. Dissertação (Mestrado) - EESC - Universidade de São Paulo.

<sup>4</sup>OUNO, R. O. et al. *Tratamento de despejos líquidos das indústrias de suco cítrico*. São Paulo. CETESB, DCON-1, 1983

Além de remover a sujeira, a lavagem tem o objetivo de eliminar resíduos de pesticidas. Nesse processo é gerada parte dos despejos a ser tratada.

Após a lavagem, as frutas passam por uma esteira onde ocorre mais uma seleção manual com a finalidade de separar as frutas que eventualmente, se estragaram nos processos anteriores. Uma vez efetuada essa separação, as frutas seguem por um sistema de roletes para uma seleção de acordo com os seus diâmetros. Esse processo é automático, contínuo e em função das extratoras que são reguladas para trabalhar com dimensões determinadas. Essa regulagem é feita pelo classificador e as extratoras podem trabalhar com três tamanhos de frutas.

### **3.2.3- Extração do suco**

A extração se processa em unidades chamadas extratoras, nas quais o suco, o óleo essencial e o bagaço são extraídos separadamente. Cada extratora é constituída por cinco copos que atuam por compressão, e um tubo cilíndrico perfurado no centro por onde escoo o suco. A casca, o bagaço e as sementes saem juntos para um sistema de transporte.

Na compressão, o suco e o óleo essencial são obtidos simultaneamente, porque o momento em que ocorre a compressão as bolsas do flavelo se rompem, liberando o óleo. Imediatamente a parte externa da fruta recebe um jato de água que carrega o óleo emulsionado para outro compartimento da extratora. Cada extratora executa 75 a 100 batidas por minuto, sendo processada uma laranja por vez.

### **3.2.4- Produção de suco concentrado congelado**

Após a extração, o suco é conduzido para equipamentos denominados de "finishers", constituídos por uma peneira cilíndrica através da qual o suco é impelido por meio de uma rosca sem fim. Nesses "finishers" ocorre a remoção das sementes, parcelas de polpas ou outro material sólido insolúvel provenientes da extração. Nesse processo pode ocorrer um segundo peneiramento ou lavagem com água para remover adicionais sólidos solúveis. Os resíduos dessa etapa (polpa e semente) são encaminhados a fábricas de pellets.

Após percorrer os "finishers", o suco passa por um processo de centrifugação que tem a finalidade de aumentar ainda mais o teor de polpa.

Uma vez processada a centrifugação o produto é submetido a uma pasteurização a 104°C. Esse processo tem a finalidade de inativar enzimas que podem provocar a separação da matéria suspensa do suco concentrado.

A concentração propriamente dita é feita em evaporadores de múltiplo efeito do tipo filme descendente em baixa temperatura (45 a 60°C) e vácuo elevado. O suco geralmente é concentrado a 65° Brix, cuja concentração é controlada através de refratômetros. A evaporação remove o teor de água sem interferir na qualidade do suco e recupera a sua essência. Os despejos gerados nesta etapa são as águas condensadas do evaporador e do condensador barométrico. Essas águas são reaproveitados em quase sua totalidade, após passar por torres de resfriamento. Apenas o excesso do condensador barométrico é destinado diretamente para a estação de tratamento de águas residuárias. A outra parte é conduzida para o tratamento depois de sua utilização na limpeza da fábrica, equipamentos e lavagem de frutas. Essas águas reutilizadas constituirão o efluente denominado de "água amarela".

Depois do processo de concentração, o suco é submetido a um resfriamento sob agitação contínua, com a finalidade de homogeneizar o produto. Um segundo resfriamento é efetuado a temperatura de - 7 °C. Só então o suco é enviado para tanques de refrigeração de inox com capacidade de 500 toneladas, e uma pequena parte (máximo 10 %) é acondicionada em tambores metálicos revestidos internamente por uma camada de verniz especial, com capacidade de 200 litros. O armazenamento do suco é feito a temperatura de - 18°C.

### **3.2.5- Produção de óleo essencial**

O óleo essencial é obtido durante a extração quando os flavelos são rompidos. Inicialmente é constituído de água, óleo e bagacilho. Todo esse material é conduzido ao "finisher" onde é submetido a um peneiramento para remoção de bagacilho, ficando uma emulsão constituída de 80 % de água e 20 % de óleo. A seguir, essa emulsão é submetida a duas centrifugações. Na primeira obtém-se 92 % de óleos e 8 % de água. Na segunda, é obtido o óleo puro. Ele é mantido,

inicialmente, por um determinado período, a uma temperatura de 0°C para que se processe a remoção de cera ("Dewaring"). Após esta separação, o óleo é embalado em tambores metálicos revestidos de verniz. O despejo gerado nesta etapa é constituído de bagacilho, da água separada nas centrífugas e uma parcela de óleo.

### **3.2.6- Produção de pellets para ração de gado bovino e álcool**

Para a produção de pellets e álcool são utilizados o bagaço, a casca, a polpa e outros rejeitos das etapas anteriores. Todo esse material é triturado em moinhos e sofre a adição de 0,3 a 0,5 % de cal com a finalidade de liberação de água. O período de contato ou de reação é o tempo de percurso na rosca sem fim. A seguir ocorre a prensagem, obtendo uma parte líquida e outra sólida. A parte líquida é filtrada em peneira estática "hidrasieve" e é denominada de licor prensado. Esse licor é destinado ao tanque de alimentação do evaporador. A concentração final é realizada em evaporadores de múltiplo efeito pelo reaproveitamento do calor residual dos gases do secador e é obtido nesse processo, o melão cítrico com uma concentração de 40 a 45 °Brix. Uma parte do melão cítrico é destinada à destilaria para a produção de álcool. A outra parte é misturada a parte sólida obtida na prensagem e o produto é submetido a uma peletização, ou seja, produção de base para a ração granulada na forma de pellets, que é armazenado em silos.

Outro subproduto obtido no segundo estágio de evaporação é o d'limolene. Esse subproduto é utilizado em indústrias químicas para a preparação de isopropene, de certos tipos de plásticos e como constituinte de óleos penetrantes, tintas, solventes, combustível, etc.

Os despejos gerados na produção de pellets e de álcool são provenientes da água condensada do licor prensado no evaporador que é reaproveitada, e da água condensada dos gases do secador, denominada de "água preta". Essa última, constitui um efluente separado.

### 3.3- Características das águas residuárias da Indústria Cítrica

A Figura 1 esquematiza o fluxograma da geração de resíduos líquidos na Citrosuco.

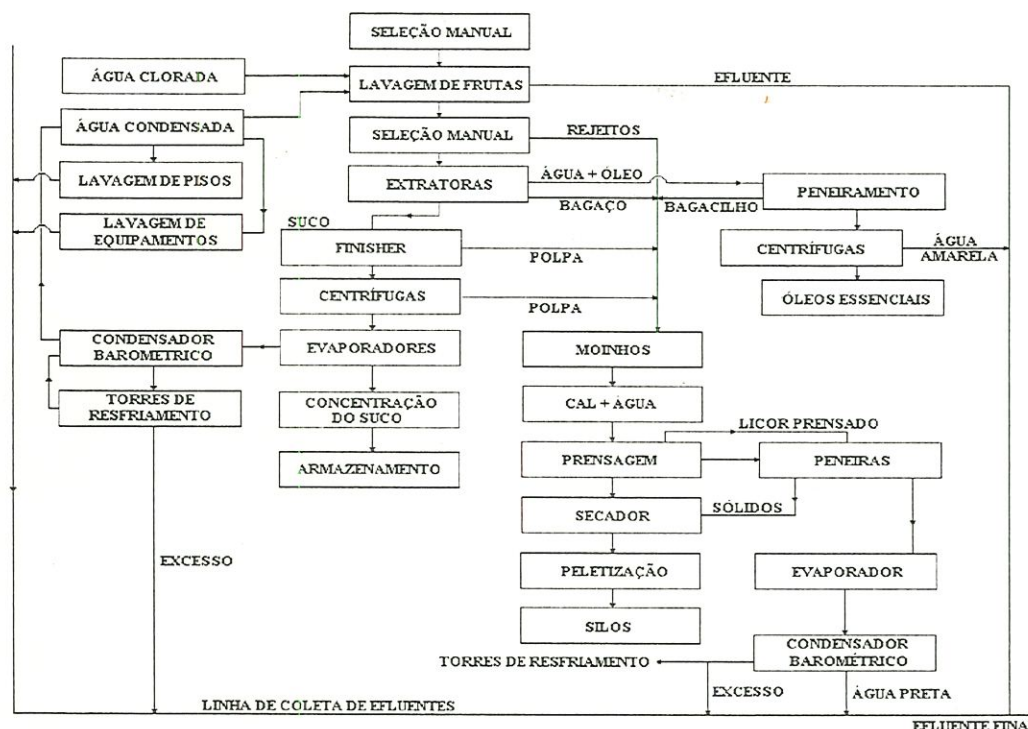


FIGURA 1 - Fluxograma de produção de suco de laranja na Citrosuco (Matão-SP)

Os efluentes líquidos das indústrias de processamento de frutas cítricas apresentam problemas do ponto de vista de tratamento, sendo completamente variáveis em composição com o tempo, de uma indústria para outra e dentro de uma mesma fábrica.

SOUZA (1980), em trabalho realizado na Cargill Industrial, cita que os efluentes gerados no processamento de frutas cítricas formam quatro grupos distintos: (1) água de fábrica, (2) água preta, (3) esgotos sanitários e (4) águas de utilidades.

Segundo SOUZA (1980), a água de fábrica é originada dos despejos líquidos provenientes das operações de lavagem de frutas, limpeza de pisos e equipamentos, etc., formados a partir da utilização do condensado dos evaporadores de suco e da própria água potável aduzida para este fim. Apresenta cor amarelada e contém grande quantidade de sólidos como sementes, polpa, bagaço, frutas



descartadas e qualquer resíduo que caia nos pisos das máquinas e dos tanques. É o efluente mais importante das indústrias cítricas, onde os sólidos e sucos removidos nas operações de limpeza transferem ao mesmo uma carga orgânica solúvel e baixo pH.

SOUZA (1980) cita que em casos eventuais de vazamentos acidentais de suco das tubulações ou tanques, o poder poluidor do efluente ao meio ambiente é acentuado, tornando-se mais agravante ainda quando algumas fábricas não dispõem de apropriados sistemas de recuperação da polpa, descarregando-a junto com o efluente. Essa mistura provoca um aumento considerável do teor de sólidos totais e da DBO do despejo, elevando a mesma a valores 5 a 10 vezes maiores do que a usual.

Outra característica agravante deste despejo, citada pelo autor, é a ausência quase que completa de nitrogênio e fósforo, o que compromete a sua tratabilidade por meios biológicos simplificados.

SOUZA (1980) cita que a água preta é originada dos despejos da fábrica de "pellets" e é um efluente de coloração negra devido a presença de partículas de carbono, enxofre e sólidos finos queimados na operação de secagem. Seu pH é mais baixo do que nos despejos das águas de fábrica, devido a presença de ácido sulfúrico formado pelo enxofre do óleo B.P.F. (óleo pesado de Baixo Ponto de Fulgor) queimado dentro do secador. As temperaturas são mais elevadas já que não ocorre o reaproveitamento dos condensados, considerando-se que as operações de lavagem permitem uma troca de calor com o ambiente. No caso, a água preta é um efluente que deve ser separado devido o seu alto poder de corrosão.

Por fim, SOUZA (1980) cita que todos os efluentes se juntam, inclusive os de origem sanitária, antes do lançamento nos corpos hídricos (resultados finais dos parâmetros são apresentados na Tabela 4).

TABELA 4 - Características físico-químicas finais dos efluentes da Cargill Industrial - (1980)

PARÂMETROS	VALORES		
	MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO
Temperatura (°C)	36,0	38,5	42,5
pH	4,0	4,7	6,5
S.S. *	13,0	75,0	180,0
S. Filtráveis *	630,0	1020,0	1210,0
S. N-Filtráveis *	940,0	1160,0	1508,0
S. Totais *	1573,0	2180,0	2718,0
DBO <sub>5</sub> Total *	1480,0	2850,0	4050,0
DBO <sub>5</sub> (Filt.) *	1290,0	2340,0	3640,0
DQO Total *	3320,0	5120,0	7677,0
DQO (Filt.) *	2890,0	4330,0	6310,0
DQO/DBO	1,40	1,85	2,24
Óleos e Graxas *	18,60	78,50	164,00
P total *	0,60	1,70	2,70
N - amoniacal *	2,25	7,10	21,20
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> *	0,01	0,15	0,24
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> *	4,50	27,60	38,00
N total *	21,00	28,30	44,00

FONTE: SOUZA (1980) - \* medidas em mg/l

### 3.4- Sistema de tratamento atualmente existente na Citrosuco

Desde o início de suas atividades a Citrosuco vem investindo na melhoria do tratamento de efluentes de suas indústrias. A operação principal de uma unidade produtora de suco concentrado de laranja é a eliminação da água contida na fruta "in natura". Além disso, as operações de higienização são as maiores responsáveis pela produção de efluentes. Para reduzir significativamente o volume de efluentes gerados, a Citrosuco, unidade de Matão, investiu na implantação de um sistema de reciclagem de água e produtos químicos utilizados. Parte da água evaporada é condensada e acumulada em tanques de 200.000 litros para ser usada na limpeza e geração de vapor. De maneira semelhante, alguns produtos químicos usados na higienização são reciclados várias vezes antes de serem enviados para o tratamento.

Segundo LIMA (1993) os sistemas atuais de tratamento dos efluentes líquidos da Citrosuco, unidade de Matão, são constituídos por unidades de lodos ativados, tratando 60 % das águas residuárias, lagoas de estabilização anaeróbias e

lagoas aeradas mecanicamente responsáveis pelo tratamento de 28 % das águas residuárias, reator de anaeróbio de manta de lodo (UASB), com capacidade para 9 % e um sistema de irrigação para 3 % do total a ser tratado.

Para evitar acidentes ecológicos foi construído um anel coletor, ao longo do Rio São Lourenço (que corta a Cidade de Matão), visando captar qualquer vazamento acidental, desviando-o para o sistema de tratamento de efluentes.

#### LODO ATIVADO

O sistema tem capacidade de tratar, segundo a Citrosuco (1993), até 320 m<sup>3</sup>/h e eficiência operacional de 95%, para uma DQO média afluente de 4.000 mg/l. É um sistema confiável, porém de custos operacionais elevados, devido a alta demanda de energia empregada no processo de aeração. O custo operacional, segundo a Citrosuco, é US\$ 0,20/kg DQO.

#### LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

O sistema de Lagoas empregado na Citrosuco tem um volume total de 152.000 m<sup>3</sup> e capacidade de tratar 180 m<sup>3</sup>/h de efluentes, com eficiência operacional de 85 a 95%, para uma DQO média afluente de 7.000 mg/l. O custo operacional, segundo a Citrosuco (1993), é US\$ 0,10/kg DQO.

#### TRATAMENTO POR IRRIGAÇÃO

No tratamento por irrigação, os efluentes são lançados por aspersão em terrenos gramados. Parte do efluente se evapora no lançamento e o restante é absorvido pelas plantas e pelo solo. A matéria orgânica degradada na parte superior do solo é consumida pela vegetação. A taxa máxima de lançamento é cuidadosamente monitorada através de amostras de água captadas em várias profundidades.

### **3.5- Importância da Coagulação/Floculação dos efluentes líquidos precedendo ao processo de flotação por ar dissolvido**

A coagulação/floculação é largamente empregada no tratamento de águas e efluentes para separação de partículas de uma fase líquida. De uma maneira

simples, segundo HO & TAN (1989), o processo consiste em acrescentar uma pequena quantidade de um coagulante inorgânico em uma dispersão, de onde flocos visíveis, constituídos de materiais coloidais, são formados e podem ser removidos do líquido clarificado por processos físicos como centrifugação, filtração ou flotação.

HO & TAN (1989) trabalhando com efluentes de uma indústria de processamento de óleo de palmeira, verificaram a influência da adição de agentes coagulantes e floculantes na eficiência de uma unidade de flotação por ar dissolvido. Os autores verificaram que, sem a adição desses agentes químicos, foi alcançada uma eficiência de 94% e 80% na remoção de sólidos suspensos e DBO respectivamente. Entretanto, com a adição do sulfato de alumínio e de um polieletrólito no sistema de flotação, foi observada uma maior eficiência de remoção. A eficiência de remoção de DBO foi significativamente aumentada para 90%, enquanto que a remoção de sólidos suspensos apenas aumentou para 97%. O coagulante inorgânico junto com o polímero desestabilizam os particulados. Os flocos desenvolvidos puderam então aderir às micro-bolhas resultando em uma melhor eficiência de remoção de flocos suspensos por flotação.

Como será visto adiante vários parâmetros são importantes no processo da flotação. Alguns tipos de efluentes, com suas características específicas, podem ser pré-tratados (pelo processo da flotação) sem a adição de agentes químicos. Para outros efluentes, entretanto, o emprego da flotação só é possível com a adição de agentes químicos.

### **3.6- O processo de Flotação por Ar Dissolvido (FAD)**

Segundo METCALF & EDDY (1991), no tratamento de águas residuárias, a flotação é usada principalmente para remover material suspenso e para concentrar lodos biológicos. A principal vantagem da flotação sobre a sedimentação, segundo os autores, é que partículas muito pequenas ou leves, que sedimentam devagar, podem ser removidas mais eficientemente e em um tempo menor, significando, portanto, unidades de tratamento menores.

De acordo com ZABEL (1984) e HYDE & MILLER (1977)<sup>5</sup> apud REALI (1991), os três processos básicos envolvidos na flotação são: o processo de geração de bolhas, o processo de ligação de bolhas ao material a ser flotado e o processo de separação dos sólidos.

### 3.6.1 - O processo de geração de bolhas

De acordo com o processo de geração de bolhas a flotação pode ser dividida em três grandes grupos, descritos a seguir:

#### - Flotação por ar disperso ou por Ar Induzido (F.A.I.)

Este grupo engloba as modalidades que utilizam bolhas de gás (normalmente o ar) com dimensões relativamente grandes, na faixa de 0,3 a 2,0 mm de diâmetro. Envolve o uso de violenta agitação freqüentemente através de rotores, para promover a dispersão, aeração e agitação do líquido a ser processado. Pode-se citar as seguintes técnicas de flotação pertencentes a este grupo:

- "Froth Flotation" : é a técnica usada freqüentemente na indústria de mineração (metalurgia extrativa). O minério bruto (moído) é condicionado com reagentes adequados e, em seguida, o sistema é submetido a agitação intensa através de turbinas onde se introduz o ar. As bolhas de ar colidem com as partículas e aderem a elas (se a partícula for hidrofóbica). As bolhas com as partículas hidrofóbicas adsorvidas sobem então ao topo do reator onde ocorre a remoção da espuma formada. Os reagentes normalmente empregados são: i) "collectors", ii) "frothers" e iii) "ativadores" e "depressores".

- "Foam Flotation" : é a técnica em que as bolhas são geradas fazendo-se o gás passar por uma placa porosa localizada no fundo reator. Pode ser subdividida em: i) "Ion Flotation" e "Foam Flotation" que envolvem a remoção de íons de uma solução pela adição de "collectors" seguidas da introdução de ar comprimido (freqüentemente através de placas porosas). No primeiro caso os íons e o agente tensoativo formam um precipitado insolúvel (escuma) sobre a interface ar/água, no segundo, nenhuma fase sólida é formada; ii) "Precipitate Flotation" em que os íons reagem com uma

---

<sup>5</sup> HYDE, R.A. ; MILLER, D.G. apud REALI (1991). Water Clarification by Flotation. *Journal of the American Water Works Association*, vol. 69, n. 7, p. 343-406, jul. 1977.

substância não tensoativa formando um precipitado, o qual é então removido por flotação com a adição de um tensoativo; iii) "Adsorving Colloid Flotation" onde o material dissolvido é coletado pela adsorção ou co-precipitação sobre partículas coloidais, as quais são então removidas por flotação.

#### **- Flotação Eletrolítica**

A flotação eletrolítica ou eletro-flotação consiste basicamente na geração de micro bolhas de oxigênio e hidrogênio no interior da suspensão a ser tratada, através de uma aplicação de corrente elétrica entre pares de eletrodos colocados no fundo do reator, ou seja, as bolhas de gases são provenientes da eletrólise da água.

Segundo ZABEL (1982)<sup>6</sup> apud REALI (1991), inicialmente empregava-se alumínio ou aço como eletrodo de sacrifício. Entretanto, tais materiais resultaram em altos custos de manutenção e reposição de eletrodos. Trabalhos anteriores a cerca da eletrólise da água do mar indicaram que as ligas de titânio e platina forneciam eletrodos com maior vida útil, mas com custo excessivamente elevado. Mais recentemente, foi pesquisada a utilização de dióxido de chumbo como material de eletrodo. Como o dióxido de chumbo possui pouca resistência quando compactado, foi necessário depositá-lo sobre outro material, tendo sido escolhido o titânio. Dessa forma, o dióxido de chumbo é depositado sobre a superfície de um eletrodo de titânio a partir de uma solução eletrolítica, resultando num material com vários anos de vida útil. Além desse tipo de material, diversos tipos de aço inoxidável têm sido utilizados.

Ao lado da desvantagem da reposição relativamente freqüente dos eletrodos, outro problema dessa modalidade de flotação consiste na rapidez com que os eletrodos podem ficar sujos, exigindo-se usualmente a instalação de dispositivos para a limpeza dos mesmos. O consumo de energia depende da condutividade do líquido e da distância entre eletrodos, situando-se na faixa de 0,5 a 0,7 KW/m<sup>2</sup> de área superficial do reator, produzindo-se de 50 a 60 litros de gás/h.m<sup>2</sup> de área.

---

<sup>6</sup>ZABEL, T.F. apud REALI (1991). Flotation in water treatment. NATO ASI Series, p. 349 - 378, 1982.

O tamanho de bolhas geradas por esse processo é geralmente menor que o conseguido na flotação por ar disperso e na flotação por ar dissolvido. Desta forma, gera-se pouca turbulência durante a geração das micro bolhas, tornado tal processo atraente para a flotação de flocos frágeis e pouco densos. Entretanto, a taxa de aplicação superficial exigida para a eletro-flotação freqüentemente é muito baixa, 1 a 4 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h, quando comparada com a faixa de 8 a 12 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h empregada na flotação por ar dissolvido.

Assim sendo, ainda segundo ZABEL (1982)<sup>6</sup> apud REALI (1991), a aplicação da eletro-flotação tem se restringido ao tratamento de águas residuárias e espessamentos de lodos. Sendo que para pequenas instalações (vazão na faixa de 10 a 20 m<sup>3</sup>/h) a eletro-flotação tem demonstrado ser bastante competitiva, enquanto que para instalações maiores a flotação por ar dissolvido é mais econômica.

#### **- Flotação por Ar Dissolvido (FAD)**

Na flotação por ar dissolvido, as bolhas de gás são obtidas através da liberação de parcela do gás (normalmente o ar), previamente dissolvido na massa líquida, devido a um subsequente abaixamento da pressão a que está submetido este líquido. Desta forma, consegue-se a geração de bolhas sem a utilização de agitação violenta.

De acordo com a maneira como é promovida a diminuição da pressão (e subsequente liberação do gás dissolvido), a flotação por ar dissolvida adquiriu as seguintes denominações: flotação à vácuo e flotação por pressurização.

##### **- Flotação à vácuo**

Na flotação à vácuo o líquido é aerado sob a pressão atmosférica e é encaminhado a uma câmara de vácuo, onde o ar dissolvido é liberado devido a queda de pressão na câmara. A flotação à vácuo está sujeita a limitações porque não é, economicamente falando, possível a utilização de elevados valores de pressões negativas (vácuo) nas câmaras mas, todavia, é muito utilizada na indústria de papel para recuperação e concentração de fibras.

#### - Flotação por Ar dissolvido por Pressurização

Na FAD por pressurização, por outro lado, o líquido é "aerado" numa câmara (câmara de saturação) sujeita a altas pressões, fazendo com que desta maneira uma grande quantidade de ar se dissolva no líquido. O líquido é encaminhado a uma câmara com pressão próxima à atmosférica liberando uma grande quantidade de pequenas bolhas de ar. Por isso, a utilização da FAD por pressurização é mais vantajosa, pois é possível uma maior diferença de pressão entre a câmara de saturação e a de flotação, possibilitando que uma maior quantidade de gás seja liberada da solução.

Existem três variações do método de flotação por ar dissolvido por pressurização: FAD com pressurização total do afluente, FAD com pressurização parcial do afluente e FAD com recirculação pressurizada do afluente.

- Flotação por Ar Dissolvido com pressurização total do afluente: a totalidade da vazão afluente é pressurizada. Normalmente o líquido a ser clarificado possui material em suspensão que possa ser submetido à intensa agitação que ocorre na bomba de pressurização.

- Flotação por Ar Dissolvido com pressurização parcial do afluente: somente uma parte da vazão afluente é pressurizada.

- Flotação por Ar Dissolvido com recirculação pressurizada: neste caso, pressuriza-se uma parcela do efluente já clarificado, recirculando e misturando a mesma com o efluente. Esta variação é aconselhável nos casos onde estão presentes no afluente, partículas frágeis (flocos, por exemplo), as quais sejam suscetíveis de quebra de estrutura ao passarem pela bomba.

#### **3.6.2 - Fatores que influenciam no tipo de bolha formada**

Como foi visto existem várias técnicas conhecidas no processo de geração das bolhas e, como será visto, vários fatores influenciam no tipo de bolha formada. Entre esses fatores RIJK et al. (1994) citam:



## - CAVITAÇÃO

Quando a pressão baixa repentinamente no bocal ou na válvula, as bolhas são formadas provavelmente devido a cavitação. Cavitação é o crescimento (explosão) de uma bolha devido a uma redução de pressão, seguida pela implosão e ruptura da bolha em grande número de bolhas pequenas. A cavitação resulta de uma redução maior de pressão no orifício de um bocal ou uma válvula (ver Figura 2).

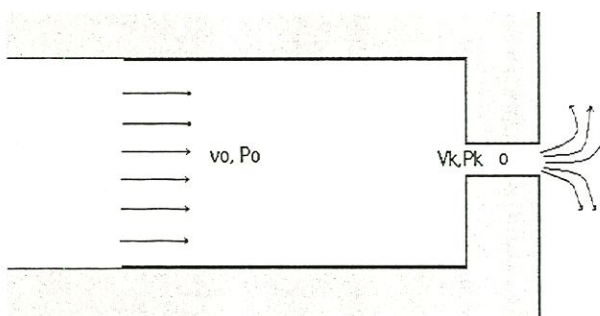


Figura 2 - Perfil de escoamento ao longo de um bocal

Através da eq.(1) (Bernouli) abaixo podemos estudar as condições no orifício do bocal ou válvula .

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho \cdot v_0^2 = P_k + \frac{1}{2}\rho \cdot v_k^2 \quad (1)$$

e devido a  $v_k \gg v_0$

$$P_k = P_0 - \frac{1}{2}\rho \cdot v_k^2 \quad (2)$$

onde:

$P_0$  e  $v_0$  são respectivamente a pressão e a velocidade antes do orifício;

$P_k$  e  $v_k$  são respectivamente a pressão e velocidade no orifício;

e  $\rho$  é a massa específica da água.

Do outro lado do orifício é formada uma zona de mistura altamente turbulenta. A turbulência nesta zona causa severas flutuações de pressões e devido a pressão no jato d'água,  $P_k$ , ser baixa ( $v_k$  é muito alta), zonas de pressões negativas podem aparecer. Devido a resistência da água ser muito boa contra estas forças

estressantes, cavidades (bolhas) são produzidas nos chamados pontos “fracos” (poluentes, irregularidades na parede, por exemplo).

#### - CRESCIMENTO DAS BOLHAS

Quando a água saturada é liberada, as bolhas serão geralmente pequenas mas o tamanho das bolhas pode aumentar devido aos seguintes fatores:

- ascensão de ar do fluxo principal super saturado. Como a formação das bolhas não está totalmente completa, o fluxo principal continua super saturado e a possibilidade de transporte de gás dentro das bolhas aumentará;

- diminuição da pressão hidrostática. Segundo JEDELE (1984)<sup>7</sup> apud RIJK (1994), este efeito no tamanho das bolhas é desprezível nas profundidades (de água) usadas na prática ;

- coalescência. Isto é a união de bolhas. Na prática parece que a coalescência ocorre principalmente na zona de turbulência perto do bocal e que a coalescência na unidade de flotação é desprezível, devido ao conteúdo total de ar na unidade de flotação ser baixo, devido as bolhas seguirem o fluxo e por esta razão não poder colidir. A possibilidade de coalescência pode ser reduzida pela a adição de produtos químicos que diminuem a tensão superficial.

#### - EFEITO DA QUEDA DE PRESSÃO NA FORMAÇÃO DAS BOLHAS

O tamanho das bolhas diminui a medida que a diferença entre a pressão na câmara de saturação e a pressão atmosférica aumenta, por exemplo, quando é aumentada a pressão de saturação. Todavia, o diâmetro médio parece estar perto de 40 ou 50  $\mu\text{m}$  [JEDELE (1984)<sup>7</sup> apud RIJK et al. (1994)]. Além do efeito no tamanho da bolha, a pressão determina naturalmente o volume de ar liberado pois a concentração de saturação do ar na água aumenta proporcionalmente com a pressão.

#### - EFEITO DO BOCAL NA FORMAÇÃO DAS BOLHAS

Investigações na operação de bocais, que são aplicados ao tratamento de água de abastecimento, indicam a importância da construção de um bom bocal,

particularmente da parte do outro lado da abertura do orifício. Um bocal mal construído causará uma liberação incompleta de ar e coalescência [TAKAHASHI et al. (1979)<sup>8</sup> apud RIJK et al. (1994)].

### 3.6.3 - Fatores que influenciam o processo da FAD

RIJK et al. (1994), enumerou os seguintes fatores que influenciam o processo de flotação:

a) **SATURAÇÃO DA ÁGUA.** O processo de FAD se baseia numa maior solubilidade do ar na água numa pressão maior. A quantidade de ar que pode ser dissolvida na água é baseada na lei de Henry:

$$C_s = K_h \cdot P \quad (3)$$

onde:  $C_s$  é a concentração de saturação do gás na água ( $g/m^3$ );  $k_h$  é o coeficiente de Henry ( $g/m^3Pa$ ), que depende da temperatura e do tipo de gás e  $P$  é a pressão parcial do gás (Pa).

Além da pressão, o volume de ar que pode precipitar de um volume de água usada na saturação depende: (a) da eficiência de saturação, que depende entre outras coisas, do tipo de saturador usado; (b) da composição do ar utilizado. Por causa do aumento da pressão parcial do nitrogênio do ar, a quantidade teórica de ar que pode ser dissolvida é reduzida em cerca de 9 % e (c) da eficiência da liberação de ar.

### b) O PROCESSO DE LIGAÇÃO DE BOLHAS AO MATERIAL A SER FLOTADO

Um parâmetro determinante no processo é o ângulo de contato  $\phi$ . Quanto maior o ângulo de contato  $\phi$  entre a superfície da partícula e da bolha, maior a

<sup>7</sup>JEDELE, K. (1984) apud RIJK et al.(1994). Application of dissolved-air flotation for segregation of the activated sludge from the water. *Stutt. Ber. Siedelungswass. Wirtsch.* (In German).

<sup>8</sup>TAKAHASHI, T.; MIYAHARA, T.; MOCHIZUKI, H. (1979) apud RIJK et al. (1994). Fundamental study of bubble formation in dissolved-air pressure flotation. *Journal Chem. Engng. Jap.*, v. 12, p. 275-280.

hidrofobicidade das partículas e, como será visto adiante, mais eficiente é a aderência entre ambas.

### ÂNGULO DE CONTATO

Ângulo de contato e tensão de adesão: o espalhamento de um líquido em uma superfície sólida é governada pela tensão superficial do líquido,  $\gamma_{LG}$ , pela tensão superficial da superfície sólida,  $\gamma_{SG}$ , e pela tensão interfacial entre o líquido e a superfície do sólido,  $\gamma_{SL}$ . O ângulo de contato  $\phi$  é um importante parâmetro termodinâmico que indica o grau de espalhamento do líquido na superfície (Figura 3).

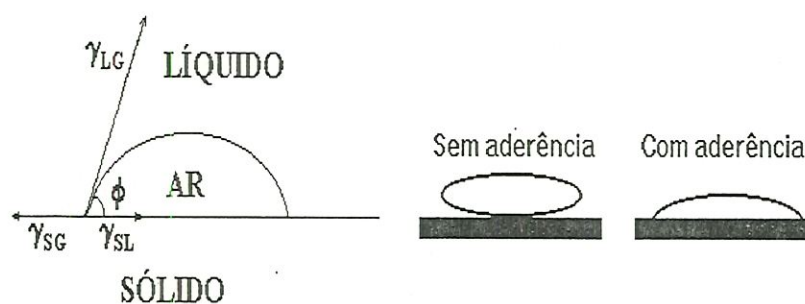


FIGURA 3 - Forças de superfície envolvidas na adesão de bolhas e partículas

Para uma superfície lisa, homogênea, com um plano indeformável, a relação termodinâmica entre as três tensões e o ângulo de contato é descrita pela equação de YOUNG. No equilíbrio,

$$\gamma_{SG} - \gamma_{SL} = \gamma_{LG} \cos \phi \quad (4)$$

O valor  $(\gamma_{SG} - \gamma_{SL})$  é conhecido como tensão de adesão. Esta é a força por unidade de comprimento aplicada pelo líquido na superfície. Esta força é de grande importância no espalhamento do líquido na superfície do sólido. Devido a dificuldade de técnicas existentes, é quase impossível medir  $\gamma_{SG}$  e  $\gamma_{SL}$  independentemente.

Todavia, é possível considerar o procedimento para medir sua diferença, que é  $\gamma_{LG} \cos \phi$ . Medindo experimentalmente o ângulo de contato do líquido com uma superfície sólida com tensão superficial conhecida, a tensão de adesão pode ser calculada. Esta é uma técnica de caracterização extremamente valiosa

que dá informações fundamentais sobre a referida adsorção de agentes tensoativos nas interfaces sólida/líquida e líquida/ar.

A relação entre a tensão de adesão ( $\gamma_{LG} \cos \phi$ ) e a tensão de superfície ( $\gamma_{LG}$ ) foi desenvolvida por LUCASSEN-REYNDERS (1963):

$$\frac{d(\gamma_{LG} \cos \phi)}{d\gamma_{LG}} = \frac{\Gamma_{SG} - \Gamma_{SL}}{\Gamma_{LG}} \quad (5)$$

onde  $\Gamma_{SG}$ ,  $\Gamma_{LG}$  e  $\Gamma_{SL}$  são as quantidades de agentes tensoativos adsorvidos por unidade de área em cada interface. A Figura 4, assumindo que  $\Gamma_{SG}=0$ , mostra como a tensão de superfície e o ângulo de contato podem ser relacionados para a referida adsorção de agentes tensoativos em cada interface.

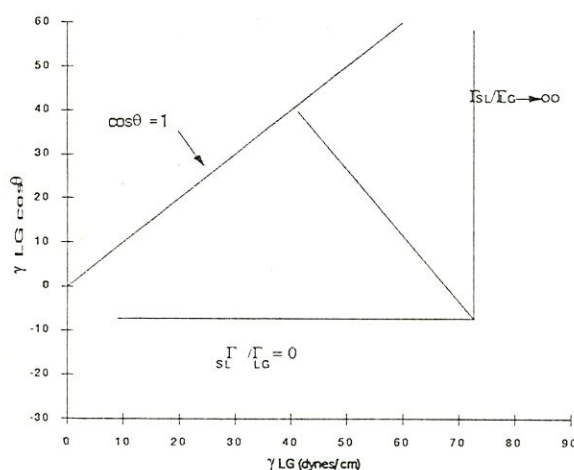


FIGURA 4 - Tensão de adesão teórica versus tensão de superfície para soluções de agentes tenso ativos assumindo  $\Gamma_{SL}/\Gamma_{LG}$  igual a zero, um e infinito

#### ADERÊNCIA ENTRE AS BOLHAS E OS FLOCOS

Segundo GOCHIN & SOLARI (1983), o estabelecimento do ângulo de contato entre a fase sólida e a bolha de ar parece ser um fator determinante no mecanismo de aderência. O sucesso da aderência depende das condições hidrodinâmicas e da hidrofobicidade das partículas. Os autores citam vários

mecanismos de contato, através dos quais a flotação pode operar com sucesso. Esses mecanismos são:

a) Colisão da bolha com a partícula causada pela turbulência e ou carga de atração;

b) Aprisionamento de bolhas pré-formadas na estrutura dos flocos, tanto (i) durante a formação do floco, como (ii) devido à quebra do floco e sua reconstituição no interior da câmara de flotação, ou (iii) como o resultado de "varredura" das bolhas em ascensão pelos flocos em sedimentação;

c) Crescimento de bolhas por nucleação, sobre a superfície dos sólidos no interior da estrutura dos flocos.

É claro que os mecanismos b (i) e b (ii) são dificilmente os responsáveis pela flotação por ar dissolvido em unidades que se promoveu a floculação, pois procura-se obter um mínimo de turbulência dentro da câmara de flotação para não haver quebra dos flocos pré-formados. Partículas aparentemente hidrófilas presume-se que os mecanismos (b) e ou (c) predominem. O baixo grau de super saturação residual sugere que seja improvável a predominância do mecanismo (c). O fenômeno de atração de cargas opostas entre as partículas e bolhas é possível a medida que a turbulência pode ser suficientemente grande para que se atinja as condições de interação das duplas camadas elétricas. Segundo GOCHIN & SOLARI (1983), a maioria dos trabalhos publicados indicam que a turbulência é o principal mecanismo de contato, salientando que todos os mecanismos que necessitem de uma ligação estável entre a bolha e a partícula, requerem um adequado grau de hidrofobicidade. Isto indica, portanto, que apenas os mecanismos b (i) e b (ii) poderiam ocorrer sem hidrofobicidade das partículas, o que é difícil.

RIJK et al. (1994), por outro lado, cita apenas dois mecanismos possíveis para a aderência entre a bolha de ar e o floco:

- a inclusão de bolhas de ar dentro dos flocos de lodo. As forças de aderência não são importantes neste caso, pois as bolhas são incluídas dentro das estruturas do floco. A ocorrência deste mecanismo aumentará se os flocos forem largos e tiverem uma forma irregular;

- adsorção (adsorption) das bolhas na parte externa dos flocos. A adesão pode estar acontecendo pois os flocos servem como um núcleo para a produção de bolhas e através de interações entre a bolha e o floco.

Em ambos os casos um sistema de três fases interage, que pode ser caracterizado por tensões superficiais e um ângulo de contato. A bolha de ar assume uma forma tal que a energia potencial nas três interfaces tenha atingido um valor mínimo. Isto depende, entre outras coisas, do tamanho das bolhas e do tamanho e natureza dos flocos de lodo, onde, depois do contato entre a bolha e o floco, um agregado realmente estável é produzido.

### c) TAMANHO DAS BOLHAS

Segundo RIJK et al. (1994) é importante que pequenas bolhas de ar sejam produzidas (< 100 a 120  $\mu\text{m}$ ), porque:

- com bolhas pequenas, é possível um menor ângulo de contato do que com bolhas maiores, ou seja, bolhas cada vez menores são necessárias para uma ligação estável, entre a bolha e a partícula, quando há um decréscimo do ângulo de contato  $\phi$  (HAHN, 1984);

- bolhas pequenas têm uma menor velocidade de ascensão em comparação com bolhas maiores, desta maneira, o tempo de residência na unidade de flotação é mais longo. Por causa disso aumenta a possibilidade de colisão entre uma bolha e um floco de lodo;

- bolhas menores necessitam deslocar menos líquido da superfície dos sólidos aos quais devem aderir;

- por causa da alta velocidade de ascensão de bolhas grandes ( $\geq 2$  mm) as forças de cisalhamento no aglomerado bolha-floco em ascensão são tão fortes que os flocos podem quebrar.

### d) NATUREZA E TAMANHO DA PARTÍCULA (FLOCO)

Segundo RIJK et al. (1994) a natureza e estrutura de uma partícula determina que tipos de mecanismos de aderência entre bolhas de gás e partículas são possíveis e, ocorrendo o contato, qual é o tamanho máximo da bolha para que a

ligação seja estável. A eficiência de colisão é proporcional ao quadrado do tamanho da partícula. Além disso, a firmeza do floco é também importante devido as forças de cisalhamento que são aplicadas durante a ascensão dos flocos (aglomerados bolha-flocos) e podem causar a sua quebra.

As Partículas podem ser hidrofóbicas ou hidrofílicas. A partícula é hidrofóbica quando sua superfície não absorve a água. Por outro lado, a partícula é hidrofílica quando sua superfície a absorve bem.

Para mudar a natureza da superfície dessas partículas bem como dos flocos formados são usados produtos químicos.

#### e) PRODUTOS QUÍMICOS

Certos compostos chamados "collectors", acrescentados na solução aumentam a hidrofobicidade das partículas.

Segundo GOPATRATNAM et al. (1992), "collectors" são moléculas orgânicas ou íons que adsorvem seletivamente na superfície da partícula, tornando-a hidrofóbica. Eles são comumente alquil-sulfatos, ácidos fracos, bases, ou seus sais, e são heteropolares, com duas extremidades funcionais: grupos iônicos (hidrofílicos) e orgânicos (hidrofóbico). A extremidade iônica (quimicamente ativa) adsorve na superfície da partícula e o grupo orgânico (quimicamente não-ativo) proporciona a superfície hidrofóbica para a partícula. Desta maneira a partícula torna-se hidrofóbica. Estes agentes podem estar presentes nas águas naturais, despejos industriais ou serem adicionados à suspensão.

O lodo é freqüentemente condicionado com polímeros orgânicos (polieletrólitos). Os polieletrólitos estimulam a produção de aglomerados de bolha-partícula em duas maneiras. Ele junta as partículas de lodo de tal modo que flocos maiores são produzidos e ele também atua como um collector de tal forma que a superfície do floco torna-se hidrofóbica. Ambos os efeitos estimulam a aderência entre a bolha e o floco.

Quando o conjunto bolha-partícula atinge a superfície, em certos casos ele pode sofrer colapso. Para evitar que a espuma fique instável, quando esta condição não seja naturalmente satisfeita, utiliza-se agentes "escumantes" ("frothers"). Além



disso, os agentes "frothers" reduzem o tamanhos das bolhas, proporcionando uma maior área superficial disponível para adsorção e maior tempo de contato.

Segundo GOPATRATNAM et al. (1992), o pH de uma água residuária é um fator importante de controle em estudos de flotação. Além de controlar a solubilidade dos metais em sistemas hidróxidos, o pH afeta a eficiência da flotação por: (1) mudança da natureza do agente collector e hidrólise de metais ou da dispersão iônica ou substâncias condensadas; (2) causando a solubilização ou aglomeração de precipitados; (3) iniciando a união de metais para condutores insolúveis (devido ao íon hidrogênio poder influenciar na adsorção); (4) causando troca iônica pela competição de sítios ativos, e (5) mudando o grau de complexidade do metal em solução. O pH de uma água residuária pode ser alterado através da adição de ácidos (diminuindo o seu valor) e bases (elevando o seu valor), por exemplo.

### **3.7 - Projeto de um sistema FAD**

Existem várias fórmulas que podem ser encontradas a partir de resultados práticos com uma unidade de FAD e que procuram facilitar o dimensionamento de futuras unidades. Convém salientar que devido a flotação ser muito dependente da natureza da superfície dos sólidos suspensos, devem ser realizados freqüentemente testes de laboratório e operação de unidades piloto para permitir a otimização do processo.

Em um projeto de um sistema de FAD, como será visto adiante, deve se levar em consideração a finalidade do uso desse sistema, como também os vários fatores que influem no processo. Entre os fatores que devem ser considerados no projeto de unidades de flotação pode-se citar: a concentração do material particulado, a quantidade do ar a ser utilizado, a velocidade de ascensão das partículas e taxa de aplicação superficial.

Segundo BRATBY & MARAIS (1976) e BRATBY & AMBROSE (1995), a flotação tem basicamente duas finalidades ou funções: a) clarificação ou separação de uma fase líquida ou sólida de uma líquida, e/ou b) espessamento do lodo ou remoção de água dos sólidos flotados.

A área requerida para a câmara de flotação é determinada em função da velocidade de ascensão dos sólidos, dependendo da concentração dos sólidos, do grau de espessamento a ser alcançado e da Taxa de Aplicação Superficial, TAS. Como veremos, estes fatores estão intrinsecamente relacionados.

BRATBY & MARAIS (1976), otimizaram o projeto de FAD para lodos ativados em função de suas principais funções: clarificação e espessamento.

### 3.7.1- Projeto de sistema FAD para clarificação

O projeto para clarificação é baseado na taxa de aplicação superficial, TAS, que por sua vez, é dependente da razão entre a massa de ar e a massa de sólidos, A/S, aplicada. Por exemplo, para uma dada vazão, um baixo valor de A/S, significa um baixo valor de TAS e, conseqüentemente, é necessária uma área relativamente maior. Conhecendo-se a TAS e a vazão total dentro da câmara,  $Q_T$ , basicamente a Área da câmara de saturação é dada por:

$$\text{Área} = (Q_0 + R) / \text{TAS} = Q_T / \text{TAS} \quad (6)$$

onde a TAS é equivalente a taxa de elevação do mais lento aglomerado bolha-partícula (em m/d) e que  $Q_T$  (vazão total) é igual a vazão afluyente de água residuária,  $Q_0$ , acrescentada da vazão de recirculação, R.

Para BRATBY & AMBROSE (1995), a relação empírica geral, que depende do tipo particular de afluyente, entre TAS e A/S é da forma:

$$\text{TAS} = k_1 (A/S)^{k_2} - k_3 \text{ (m/d)} \quad (7)$$

onde  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são constantes para um tipo particular de lodo ou afluyente.

### 3.7.2- Projeto de sistema FAD para espessamento

O projeto de uma unidade de flotação para espessamento, segundo BRATBY & MARAIS (1976), é baseada em: (i) carga sólida,  $Q_s$  ( $\text{kg m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ), que é igual a massa de sólidos introduzida por unidade de área da unidade de flotação por unidade de tempo, e (ii) espessura ou profundidade do lodo flotado acima do nível da água, h. Para uma concentração desejada de sólidos flotados,  $C_F$ , existe uma combinação particular de  $Q_s$  e h que conduz a um menor custo total (capital de

implantação e operacional). Uma vez que  $Q_s$  e  $h$  forem selecionados, a área requerida para espessamento é dada por:

$$\text{ÁREA} = C_0 Q_0 / Q_s \quad (8)$$

onde  $C_0$  é a concentração de sólidos do afluente e  $Q_0$  é a vazão afluente.

Como foi visto, durante a flotação os aglomerados bolha-partícula sobem e são separados da fase líquida gerando um lodo que atinge uma determinada concentração  $C_F$ . Os parâmetros que influenciam a concentração do lodo,  $C_F$ , são a carga sólida,  $Q_s$  e a espessura do lodo acima do nível da água,  $h$ .

Empiricamente, segundo BRATBY & MARAIS (1976) e BRATBY & AMBROSE (1995),  $C_F$  está relacionado com  $Q_s$  e  $h$  da seguinte forma:

$$C_F = k_4 (h)^{k_5} Q_s^{-k_6} \quad (9)$$

onde  $k_4$ ,  $k_5$  e  $k_6$  são constantes para um tipo particular de lodo ou afluente.

Apesar da razão A/S não influenciar na concentração do lodo flotado, ela afeta a densidade da massa de lodo flotado pela troca de água intersticial por ar. A razão A/S tem uma grande importância na espessura  $h$  do lodo na unidade de flotação.

Sendo  $h'$  a espessura da camada de lodo flotado abaixo do nível da água, a relação entre a razão A/S e a razão  $h'/h$  é dada por:

$$\frac{h'}{h} = d \cdot (A/S)^{-e} \quad (10)$$

e, para lodo ativado:  $d = 0,76$  e  $e = 0,45$ .

A espessura total do lodo ( $h' + h$ ) em metros é dada por:

$$(h' + h) = h [(A/S)^{k_7} + k_8] A/S^{-k_7} \quad (11)$$

onde  $k_7$  e  $k_8$  são constantes para um tipo particular de lodo ou afluente.

Os valores de  $k_1$  até  $k_8$  encontrados para vários despejos por BRATBY & AMBROSE (1995) são apresentados na Tabela 5.

Segundo BRATBY & AMBROSE (1995), a exatidão da expressão para a espessura total do lodo ( $h' + h$ ) torna-se incerta em razões A/S abaixo de certos valores. Em razões A/S mais baixas, a espessura do lodo flotado, na prática, tende a ser maior que àquela prevista pela eq. (11). Com lodo ativado, com ou sem o uso de polímeros, a razão A/S limitante é cerca de 0,02; com esgoto bruto, usando

coagulantes metálicos de alumínio (sulfato de alumínio) ou ferro, a razão A/S é cerca de 0,03; com floculação aplicada ao espessamento de lodo de águas altamente coloridas, usando polímero, a razão A/S limitante é cerca de 0,03.

TABELA 5 - Valores das constantes de flotação para vários dejetos

DEJETO	CONSTANTE							
	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>	k <sub>5</sub>	k <sub>6</sub>	k <sub>7</sub>	k <sub>8</sub>
Lodo ativado: características muito pobre	5.544	0,87	36	31,75	0,20	0,50	0,45	0,76
Lodo ativado: características normais	7.992	0,92	30	30,00	0,22	0,30	0,45	0,76
Lodo ativado: características normais (com polímero)	--	--	--	40,00	0,22	0,30	0,45	0,50
Esgoto bruto (com Sulfato de Alumínio)	16.800	1,78	24	33,65	0,08	0,50	1,52	0,0385
Algas de Lagoa de Estabilização (com coagulantes de alumínio ou ferro)	7.920	0,77	0	44,50	0,13	0,47	0,80	0,43
Lodos de águas altamente coloridas (com polímeros)	6.480	0,72	12	25,60	0,22	0,28	0,64	1,39

Fonte: BRATBY & AMBROSE\* (1995)

De uma análise econômica, consegue-se para lodo ativado, segundo BRATBY & MARAIS (1975)<sup>9</sup> apud BRATBY & MARAIS (1976), o menor custo total (custo de implantação + custo operacional) aplicando uma razão A/S e espessura do lodo flotado acima do nível d'água, h, de forma que:

$$A/S = 0,15 / C_0^{0,36} \quad (12)$$

$$e \ h \ ótimo = (0,025C_F + 0,19) \quad (13)$$

onde C<sub>F</sub> é a concentração de sólidos desejada e h está em metros.

Por outro lado, segundo METCALF & EDDY (1991), a eficiência de um sistema de flotação por ar dissolvido depende, primeiramente, da razão entre a massa de ar em relação à massa de partículas em suspensão (A/S) necessária para se atingir um determinado grau de clarificação. Esta razão irá variar com cada tipo de suspensão e deve ser determinada experimentalmente usando uma unidade de flotação

\* Nota: Valores de k<sub>1</sub> até k<sub>8</sub> são compatíveis com TAS em m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d, h em m e Q<sub>S</sub> em Kg/m<sup>2</sup>d.

<sup>9</sup>BRATBY, J & MARAIS, G. v. R. apud BRATBY & MARAIS (1976). *Dissolved-Air (Pressure) Flotation - An Evaluation of Inter-Relationships between Process Variables and their Optimization for Design*. Water S.A. v. 1, n. 2, July, 1975.

em escala de laboratório. Segundo os mesmos autores, os valores típicos da razão A/S para espessamento de lodo variam de 0,005 a 0,060.

Ainda, segundo METCALF & EDDY (1991), a relação entre a razão A/S, a solubilidade do ar, a pressão de operação, e a concentração de partículas em suspensão para um sistema onde todo o fluxo é pressurizado é dada pela equação:

$$\frac{A}{S} = \frac{1,3 \cdot sa \cdot (f \cdot P - 1)}{S_s} \quad (14)$$

onde: A/S = razão ar/sólidos (mg/mg); sa = solubilidade do ar (ml/l) numa dada temperatura; f = fração do ar dissolvido na pressão P; P = pressão absoluta (atm), e S<sub>s</sub> = sólidos suspensos (mg/l).

A equação correspondente para um sistema com recirculação pressurizada é:

$$\frac{A}{S} = \frac{1,3 \cdot sa \cdot (f \cdot P - 1) \cdot R}{S_s \cdot Q_0} \quad (15)$$

onde: R = vazão de recirculação pressurizada (m<sup>3</sup> / dia) e Q<sub>0</sub> = vazão do líquido afluyente (m<sup>3</sup> / dia).

Nas equações (14) e (15), o numerador representa o peso de ar e o denominador o peso de sólidos. O fator 1,3 é o peso em miligramas de 1 ml de ar, e o termo (-1) dentro dos parênteses leva-se em conta o fato que o sistema será operado em condições atmosféricas.

### **3.8- Aproveitamento do lodo ou de substâncias nutritivas presentes em indústrias alimentícias em geral**

O lodo gerado em estações de tratamento de efluentes apresenta-se como um problema de disposição para as indústrias e, portanto, o seu reaproveitamento pode significar a minimização deste problema. O lodo de indústrias alimentícias, por exemplo, é uma fonte potencial de proteínas e vitaminas no suplemento da alimentação de animais. As concentrações altas de metais, pesticidas, e patogênicos, todavia, apresenta-se como um risco para a saúde. O problema de patogênicos e produtos químicos podem não existir com o lodo de estações de tratamento de indústrias alimentícias. Na maioria das estações, segundo

CLEVINGER (1990), os dejetos sanitários são retidos separadamente, limitando os patogênicos. Se todos os produtos químicos usados puderem ser incorporados ao alimento, as fontes de metais e pesticidas também devem ser baixa.

CLEVINGER (1990) estudou sete diferentes tipos de indústrias alimentícias (leite, papel, soja, batatas, porco, peixe e frango) com o propósito de determinar a segurança da composição química do lodo dessas indústrias. Segundo CLEVINGER (1990), o lodo ativado proveniente de estações de tratamento da indústria de laticínios, por exemplo, contém entre 28,7 e 40,9% de proteína bruta, cinzas (26,4 - 46,0%) e gorduras (0 - 3,7%). Setenta por cento da proteína bruta no lodo estavam na forma de aminoácidos. A composição de aminoácidos no lodo é comparável favoravelmente com uma refeição de soja. O lodo continha mais metionina, cistina, treonina e valina, tendo, porém, níveis ligeiramente menores em outros sete aminoácidos essenciais. O lodo tinha um excelente balanço de aminoácidos essenciais e tem um grande potencial como fonte de proteína para alimentação animal.

Os lipídios são a maior fonte de energia e muitos nutrientes essenciais, especialmente para animais recém nascidos. No trabalho realizado por CLEVINGER (1990), foram examinados na biomassa proveniente da indústria de laticínio, quatro grandes classes de lipídios: triglicerídeos, ésteres de colesterol, ácidos gordurosos livres e colesterol. Na Tabela 6 são apresentados quantidades de lipídeos neutros e ácidos gordurosos livres encontrados nesta biomassa. Ao contrário da composição de lipídeos no leite de gado, a biomassa continha um baixo nível de triglicerídeos (1,2% dos lipídeos totais em peso) em comparação com o leite, que correspondeu a 97-98% dos lipídeos totais.

Estes resultados mostram que o lodo ativado (biomassa) não tem a mesma composição de lipídeos que o leite e isso se deve provavelmente a presença de microrganismos no lodo ativado e da ausência da parte processada do leite.

Em relação a substâncias orgânicas e inorgânicas potencialmente prejudiciais, CLEVINGER (1990), comparou o lodo ativado processado em uma indústria de laticínios com um lodo comum de tratamento de esgoto municipal. O lodo da indústria de laticínios tem muito menos concentrações de poluentes

potencialmente prejudiciais do que o lodo da estação municipal de tratamento de esgoto . O nível recomendado máximo de minerais na dieta animal, quando alimentado a 10% de lodo, não será excedido, segundo CLEVINGER (1990).

TABELA 6 - Composição de quatro lipídeos simples no lodo de laticínio

Classe de lipídeo	Quantidade dos lipídeos totais (% , em peso)	
	lodo	Leite de gado
Triglicerídeo	1,22	97,5
Ésteres de colesterol	5,00	vestígios
Colesterol	1,25	0,31
Ácidos gordurosos livres	24,95	0,027
Outros	67,6	-

Fonte: CLEVINGER (1990)

Os estudos mostraram uma grande variabilidade na concentração do afluente de uma estação de tratamento dependendo do ciclo de limpeza e do alimento produzido. Todavia, a variação foi muito menor no lodo e um produto com uma concentração consistente pode ser produzido.

O uso da FAD no pré-tratamento de efluentes de indústrias alimentícias para separar os sólidos suspensos presentes é uma boa alternativa para o reaproveitamento do lodo. Um estudo feito por JOKELA et al. (1988)<sup>10</sup> apud VIITASAARI et al. (1995) descreve o pré-tratamento de um abatedouro de porcos usando a FAD. O abatedouro descrito tem uma capacidade de manejar 320 porcos/h com consumo total de água em cerca de 700 m<sup>3</sup>/d. Antes da flotação, a água residuária do processo era passada por um sistema de gradeamento e equalizada, para então ser floculada com acidificação do pH em torno de 3 e por precipitação com lignosulfonato de sódio. O lodo flotado formado era então coagulado com vapor d'água quente e desidratado em filtros prensa. O bolo filtrado no filtro prensa é usado como material bruto para alimentação animal. Na prática, segundo VIITASAARI et

<sup>10</sup>JOKELA, P. et al. apud VIITASSARI et al. (1995). Efficient pretreatment of foodstuff industry wastewaters. In: Pawswad, T.; Polprasert, C.; Yamamoto, K., eds. Water Pollution Control in Asia, Pergamon Press, Oxford (Adv. Water Pollution Control, n.6), p.535-540, 1988.

al. (1995), a recuperação de proteína (lodo), neste caso, cobriu tanto o capital de implantação como custos operacionais do pré-tratamento por FAD. Na Tabela 7 são apresentados os dados da unidade de flotação do abatedouro e os resultados do pré-tratamento.

O uso da acidificação, segundo VIITASAARI et al. (1995), é baseado na desmulsificação de gorduras. Ela também ajuda na precipitação de proteínas. De acordo com HOPWOOD & ROSEN (1972)<sup>11</sup> apud VIITASAARI et al. (1995), o lignosulfonato não faz mal aos animais, quando sendo parte da alimentação. COOPER & DENMEAD (1979)<sup>12</sup> apud VIITASAARI et al. (1995), mencionaram que se sais metálicos são usados para a precipitação, o conteúdo metálico do lodo formado pode impossibilitar o uso deste material recuperado como suplemento de alimentação animal. Convém salientar, todavia, que esta impossibilidade vai depender do sal metálico utilizado.

Os produtos químicos adequados para este fim são, segundo GRANT (1985): sulfato e cloreto férrico, sulfato de alumínio, ácido lignosulfônico ou, preferencialmente, para a recuperação de proteínas em uma forma completamente atóxica, dicálcio fosfato. A composição de um "subproduto" seco obtido em um efluente de uma indústria de carne da Nova Zelândia é mostrada na Tabela 8. O conteúdo de proteína recuperado, segundo GRANT (1985), é comparável com uma refeição de peixe ou carne.

GRANT (1985), afirma que os efluentes de indústrias de carne, aves, peixe e laticínios são de natureza amplamente orgânicas. Os principais constituintes dos efluentes das indústrias de carne, aves e peixe são a gordura e proteína e, no caso da indústria de laticínios, proteínas e carboidratos. A DBO<sub>5</sub>, na média, varia de cerca de 1000 mg/l à 5000 mg/l, apesar de, em alguns casos (remoção de gordura de ossos, por exemplo) valores muito mais elevados terem sido encontrados.

---

<sup>11</sup>HOPWOOD, A. P.; ROSEN, G. D. apud VIITASSARI et al. (1995). Protein and fat recovery from effluents. *Process Biochemistry*, p.15-17, march, 1972.

<sup>12</sup>COOPER, R. N.; DEANMEAD, C. F. apud VIITASSARI et al. (1995). Chemical Treatment of slaughterhouse wastes with protein recovery. *Journal of Water Pollution Control Federation*, v. 51, n. 5, p. 1017-1023, 1979.



TABELA 7 - Dados da unidade de flotação do abatedouro e os resultados do pré-tratamento

DADO	QUANTIDADE OU TIPO	UNIDADE
vazão	50	m <sup>3</sup> /h
forma da unidade	circular	
Taxa de Aplicação Superficial ( TAS )	1	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> h)
pressão de saturação	600	KPa
método de coleta dos sólidos flotados	sucção	
consumo de ácido sulfúrico	400	mg/l
consumo de lignosulfonato	200 a 300	mg/l
consumo de cal	400	mg/l
remoção de sólidos suspensos ( SS )	90	%
concentração no efluente de SS	100 a 250	mg/l
remoção de DBO <sub>7</sub>	75	%
Oxigênio Dissolvido no efluente	700 a 900	mgO <sub>2</sub> /l
remoção de óleos e graxas	94	%
concentração no efluente de óleos e graxas	20 a 40	mg/l
concentração de sólidos flotados	8 a 12	%

Fonte: VIITASAARI et al. (1995).

TABELA 8 - Composição bruta de sólidos recuperados dos efluentes da indústria Gear Meat Co.

Amostra	Nitrogênio (N)*	Fósforo (P)*	cinzas*	Proteínas*
A2	9,80 ± 0,20	0,70 ± 0,02	5,1	61,3 ± 1,0
B2	11,81 ± 0,08	0,20 ± 0,05	2,3	73,9 ± 0,5

FONTE: GRANT (1985) - \* valores em g/100g

Uma composição típica de lodo ativado seco é mostrada pela Tabela 9. Este produto, segundo GRANT (1985), estava negativo de bactérias e vírus e poderia ser substituído na alimentação da truta arco-íris sem reduzir a taxa de crescimento.

Segundo GRANT (1975)<sup>13</sup> apud GRANT (1985), entre os sistemas de tratamento físico-químicos usados para recuperar a proteína suspensa e solúvel e o lodo, tanto a floculação como também a FAD são bastantes utilizados.

TABELA 9 - Composição típica de lodo ativado processado e seco

Nitrogênio	8,8 %
Proteína	51,8 %
Gordura	1,5 %
Cinzas	14,9 %
Carboidratos	4,0 %
K (em K <sub>2</sub> O)	0,3 %
P (em P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	3,4 %
N (não protéico)	0,5 %
Fe	0,18 %
Cd	0,5 ppm

FONTE: GRANT (1985)

Como foi visto, as indústrias alimentícias em geral apresentam em seus efluentes matéria prima de excelente potencial para o reaproveitamento para ração ou dieta animal. Cuidados devem ser tomados para não contaminar o lodo com metais, minerais indesejados, agrotóxicos e organismos patogênicos na adição de produtos químicos e esgotos. O aproveitamento do lodo deve significar, também, uma fonte potencial de lucro ou redução de custos de operação de uma indústria. A FAD mostra-se, por tudo o que foi descrito anteriormente, como uma boa opção para este aproveitamento.

<sup>13</sup>GRANT, R. A. apud GRANT (1985). *Effluent Water Treatment Journal*, v. 15, p. 616, 1975.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1- Considerações iniciais**

O conhecimento de parâmetros de projeto e operacionais, como já comentado, é muito importante para o bom funcionamento de um sistema de FAD. É verdade que os resultados de algumas aplicações são amplamente divulgados e conhecidos como, por exemplo, o uso da FAD na separação de sólidos do processo de lodo ativado. Convém salientar, entretanto, que cada tipo de água residuária, durante o tratamento, pode se comportar de uma maneira própria, exigindo, portanto estudos em escala piloto e de laboratório, que visam justamente este conhecimento. Neste capítulo encontram-se descritos os métodos utilizados para adequação de parâmetros ou variáveis envolvidos no tratamento físico-químico, por flotação, dos efluentes líquidos da indústria Citrossuco Paulista S/A - Unidade de Matão/SP. Apresenta-se também a descrição dos equipamentos e instalações utilizados durante a pesquisa, assim como os métodos analíticos utilizados para o monitoramento dos ensaios.

### **4.2- Caracterização dos resíduos**

Um dos parâmetros mais importantes de qualquer tratamento é, sem dúvida, os tipos dos resíduos a serem tratados. Os resíduos estudados foram dois efluentes da Indústria Cítrica CITROSUCO PAULISTA S/A, comumente chamados de água amarela e água preta.

A água amarela é constituída por resíduos provenientes da lavagem de frutas e dos equipamentos utilizados na produção do suco. O processo de limpeza ocorre, geralmente de 6 em 6 horas. A água preta é resultante do condensado oriundo da secagem do bagaço cítrico e da queima do bagaço da cana de açúcar utilizados na produção de gases quentes.

Para a caracterização dos efluentes descritos foi feito um hidrograma com a água amarela e uma caracterização físico-química, com amostras coletadas de 2 em 2 horas ao longo de um dia (24 horas) de operação da indústria. As amostras de cada efluente depois foram compostas proporcionalmente com a vazão para a realização dos ensaios. Com as amostras compostas foram realizados ensaios e determinações físico-químicas. Não foi possível, porém, fazer o hidrograma da água preta, por não existir, até o presente trabalho, um medidor de vazão para a água preta, sendo a mesma estimada através da quantidade de caixas processadas por dia. Mesmo assim, foram coletadas amostras de água preta ao longo do dia para a realização dos ensaios de caracterização do resíduo.

#### **4.3- Estudos preliminares com unidade de FAD em escala de laboratório**

Para verificar o comportamento das águas amarela e preta no tratamento por FAD foram realizados ensaios em uma unidade de FAD em escala de laboratório, comumente chamado de Flotateste. Os principais objetivos do uso do Flotateste foram: avaliar a eficiência da Flotação no pré-tratamento das águas amarela e preta separadamente; avaliar o tratamento conjunto dos dois tipos de águas estudados (mistura das mesmas antes do processo de coagulação) e determinar a dosagem ótima de coagulante (cloreto férrico), assim como pH adequado à coagulação/floculação das referidas águas residuárias. A realização desse tipo de ensaio ("batch") permite a obtenção de estimativa do consumo de produtos químicos a serem empregados no pré-tratamento com uma instalação piloto, além de fornecer também idéia da quantidade de ar necessária para o processo.

O cloreto férrico foi escolhido como coagulante pelo fato de que os flocos formados, após sua aplicação, não incorporarem componentes nocivos provenientes do coagulante na utilização dos mesmos para o preparo de ração animal. Muito pelo contrário. A adição de cloreto férrico significa, a princípio, ferro e cloretos nos flocos formados, indispensáveis na dieta animal.

A instalação de flotação por dissolvido em escala de laboratório (flotateste) empregada possui uma câmara de flotação (A) interligada a uma câmara de saturação (B), conforme mostrado nas Figuras 5 e 6.

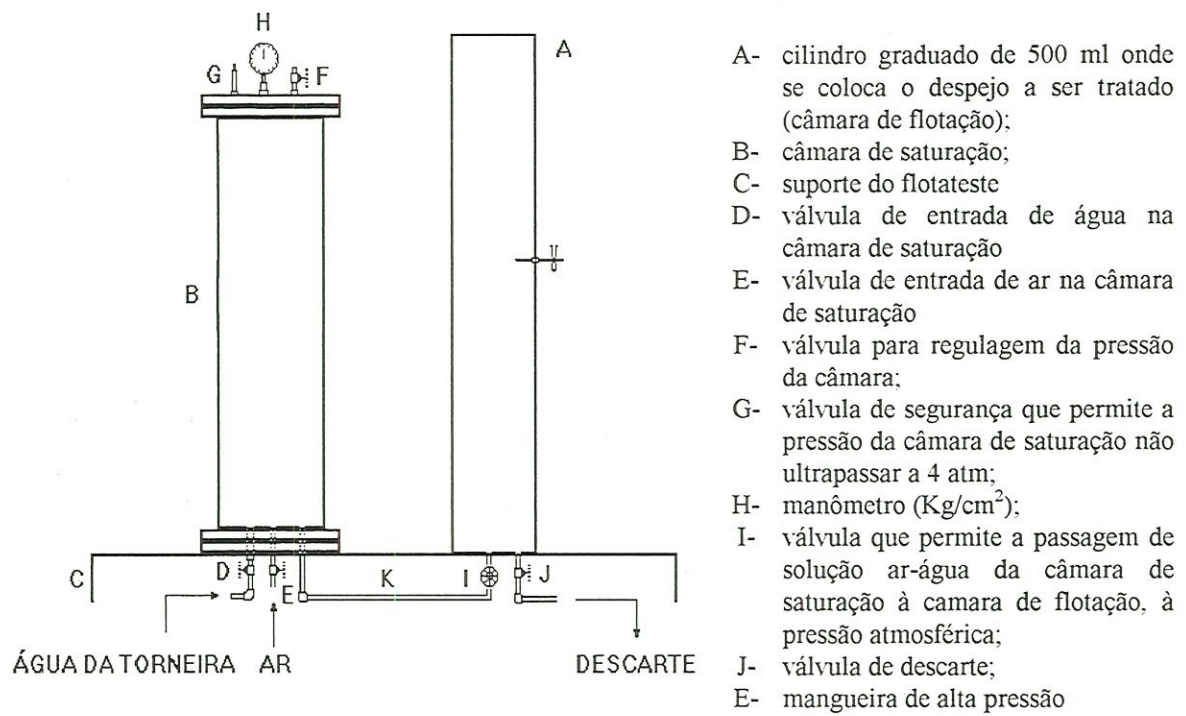


FIGURA 5 - Esquema do equipamento de Flotateste

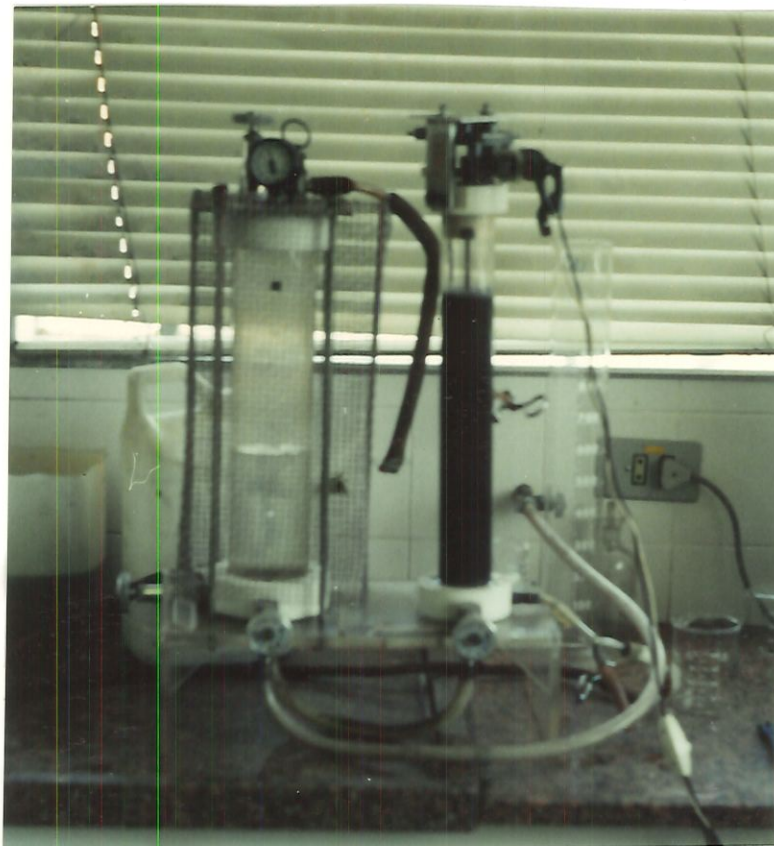


FIGURA 6 - Foto do flotateste em funcionamento

O primeiro ponto considerado foi que a água preta exigiu dosagens muito elevadas de coagulante para ser tratada individualmente (cerca de 500 mg/l de cloreto férrico). Por isso, optou-se pela mistura da água preta à água amarela para o tratamento conjunto das mesmas, ao invés do tratamento separado dos dois tipos de água residuária. Além disso, o tratamento conjunto das mesmas, apresenta grandes vantagens construtivas e operacionais, quando se considera o tratamento em escala real.

A água residuária usada em cada ensaio proveio de duas amostras independentes (amostras 1 e 2) e consistia de uma mistura de 340 ml de água amarela e 160 ml de água preta, totalizando 500 ml de água bruta. Essa é mais ou menos a proporção da produção de água preta e amarela da indústria estudada e por isso foi a utilizada.

Antes de cada ensaio com o Flotatest, promovia-se a aeração do volume de água de torneira armazenada no interior da câmara de saturação por 4 minutos a pressão de 4,5 kg/cm<sup>2</sup>. Após esse tempo de saturação, fechava-se a entrada do ar e deixava-se em repouso por 5 minutos para que o excesso de ar não dissolvido deixasse a massa líquida saturada. Pequena parcela da água saturada com ar era então descartada.

A câmara de flotação foi operada em regime de fluxo descontínuo ("batch"). Assim, após o enchimento da câmara com água bruta (preta + amarela), corrigia-se o pH (quando necessário), adicionava-se o coagulante (cloreto férrico) na dosagem escolhida, ligava-se o agitador rápido por 45 segundos para dispersão do coagulante, e o agitador lento por 10 minutos para se efetuar a floculação. Após a mistura rápida, era retirada uma alíquota da mistura para se medir o pH. As dosagens de cloreto férrico utilizadas foram: 0; 10; 20; 30; 40; 50 e 100 mg/l.

Terminado o período de floculação, era retirado o agitador lento com cuidado para não quebrar os flocos, abria-se a válvula de agulha ( I ) que controlava a entrada de água saturada pressurizada proveniente da câmara de saturação (ver Figura 6), promovendo-se a mistura de 120 ml de água saturada (com ar) com a água previamente floculada, tomando-se o cuidado de realizar sempre a introdução de água saturada em um tempo pré-determinado (45 s). Como a pressão na câmara de

flotação é a atmosférica, o ar dissolvido "em excesso" é precipitado em minúsculas bolhas que aderem nos flocos formados promovendo, conseqüentemente, a flotação dos flocos em suspensão presentes na câmara de flotação.

Após 1 minuto e 10 segundos a partir do início da injeção da água saturada pressurizada, foram coletadas as amostras da câmara de flotação em ponto situado 20 cm acima do fundo da câmara de flotação para determinação de Sólidos Suspensos Totais e obtenção de curvas de eficiência do processo. Tal tempo está associado a uma velocidade de flotação de 17,5 cm/min (247 m/dia). As curvas de eficiência estão apresentadas em função da dosagem de Cloreto Férrico e do pH da mistura.

Convém salientar que os tempos de coagulação e floculação, a quantidade de água saturada usada na recirculação variaram de acordo com a água residuária estudada. Os tempos usados no ensaios não foram totalmente otimizados. Foi verificado que o tempo de 1 minuto e 10 segundos no final de cada ensaio, por exemplo, era suficiente para a retirada de amostras, pois era clara a interface sólidos flotados - água muito acima do local de amostras, e por isso passou a ser utilizado. Por outro lado, a quantidade de recirculação de água saturada (120 ml) foi otimizada. Essa adequação foi realizada e consistiu na variação da quantidade de água saturada adicionada em ensaios independentes, onde foi verificado que a partir de uma recirculação de 120 ml, os resultados de remoção de sólidos suspensos totais nas amostras praticamente não se modificavam.

#### **4.4- Ensaios realizados com a unidade piloto de FAD**

##### **4.4.1- Considerações iniciais**

Os ensaios realizados com a unidade piloto foram divididos em duas etapas: ensaios realizados com a câmara de saturação da unidade piloto com o objetivo de medir sua eficiência e os ensaios com a unidade piloto propriamente dita que serão descritos a seguir.

#### 4.4.2- Ensaios realizados com a câmara de saturação

Os ensaios que visavam medir a eficiência da câmara de saturação foram realizados durante a entressafra, após os ensaios com a unidade piloto, conforme metodologia proposta por REALI (1991), devido ao curto período restante de safra para realizá-los. Foi usada água limpa no lugar da água estudada e para aquecer a água à temperatura dos ensaios realizados com as águas residuárias, foi utilizada uma resistência usada em caldeiras para aquecer óleo.

Foram efetuados diversos ensaios com câmara de saturação variando-se a Taxa de Aplicação Superficial (TAS) na pressão de  $4,5 \text{ kg/cm}^2$  ( $440 \pm 10 \text{ kPa}$ ) e a pressão no seu interior (pressão relativa) para avaliar seu desempenho.

Para possibilitar esta avaliação foi necessária a medição da quantidade de ar liberado em cada ensaio. A metodologia usada para essa medição foi proposta por REALI (1991), e foram necessários os seguintes materiais:

- seringa metálica com câmara interna de vidro (especial para uso na agropecuária para vacinação de bovino), com capacidade de 150 ml, para extrair as amostras de água saturada com ar;
- agulha: foi construída de forma a permitir o seu fechamento através de uma pinça de laboratório;
- dispositivo para medida de ar liberado no interior da seringa constituído de Bureta de 50 ml, com divisões de 0,1 ml tampada 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 e
- termômetro para leitura da temperatura do ar e da água.

O procedimento para essa medição consistia basicamente em:

- regulagem da temperatura da água, pressão de saturação e TAS;
- retirada da amostra pela seringa através de dispositivo na câmara de saturação, contendo um septo de silicone, do mesmo tipo daquele utilizado em cromatógrafos a gás;



- concentração na seringa do ar liberado e sua liberação no dispositivo apropriado para medição do volume de ar e água da amostra.

O procedimento completo de leitura e conversões de valores são descritos detalhadamente no trabalho de REALI (1991).

#### **4.4.3- Ensaios realizados com a unidade piloto com escoamento contínuo**

Após a realização dos ensaios com o flotateste e dos testes preliminares, foram efetuados ensaios com a instalação piloto de flotação por ar dissolvido com vistas à avaliação do sistema. A unidade piloto de FAD foi construída na Citrosuco usando chapas de aço do refugio da indústria como material construtivo. Devido a falta de pessoal disponível, a conclusão da piloto atrasou um pouco o início da realização desses ensaios.

A unidade piloto consistia , como mostram as Figuras 7 e 8, de: a) três vertedores: dois vertedores de entrada (um para a água amarela (vertedor 1) e outro para a água preta (vertedor 2) e um vertedor de saída (vertedor 3) devidamente calibrados); b) uma câmara de mistura rápida; c) duas câmaras de floculação em série; d) uma câmara de flotação com canaleta para a remoção de lodo; e) uma câmara de saturação com bomba de alta pressão (bomba de recirculação marca Jacuzzi, modelo 15H4D10) e f) dispositivo de despressurização que consistia em um registro de agulha. A unidade piloto de FAD foi operada nas seguintes condições:

- TAS aplicadas: 120; 160 e 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d;
- vazões afluentes: mínima = 0,28 ± 0,1 l/s e máxima = 0,96 ± 0,1 l/s;
- vazões de recirculação pressurizada: mínima = 0,20 ± 0,1 l/s e máxima = 0,60 ± 0,1 l/s;
- pressões de trabalho nos ensaios: 440 ± 10 kPa.

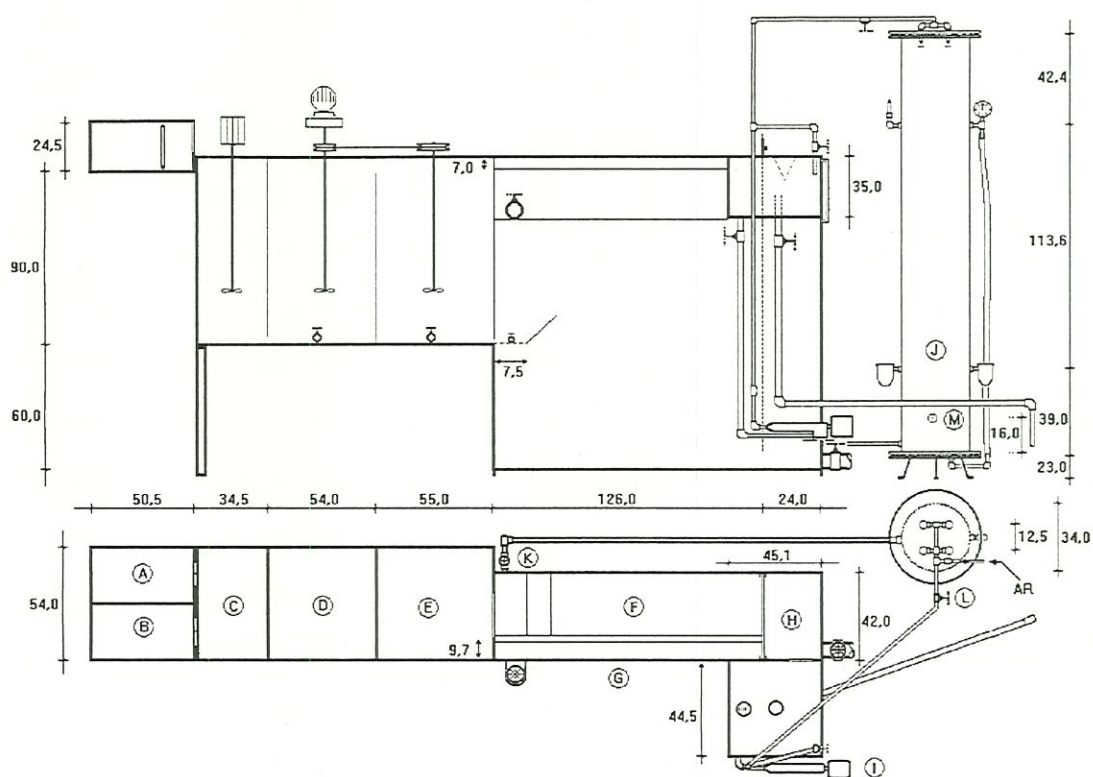
Para a realização dos ensaios era necessário que as vazões de entrada estivessem devidamente ajustadas para a taxa e proporção de mistura escolhida, tomando-se o cuidado de se manter esta vazão constante, ajustando os registros de entrada quando necessário, o que ocorria freqüentemente devido ao progressivo

entupimento desses registros causado pelo excesso de sólidos nas águas residuárias, principalmente nas vazões mais baixas.

Com o intuito de facilitar os ajustes de pressão da câmara de saturação e vazão de recirculação, a câmara de saturação era preenchida totalmente com água pois, na ausência de ar, estes ajustes eram mais rápidos. Para isso, o registro com extravasor localizado acima da câmara de saturação era aberto, o registro de despressurização era fechado, o registro de entrada da câmara de saturação era aberto e a bomba de recirculação era ligada. No momento que a câmara de saturação estava totalmente cheia d'água, o registro de despressurização (registro de agulha) era aberto, o registro do extravasor era fechado e ajustavam-se os registros de despressurização (que influenciava mais a pressão) e o de entrada da câmara de saturação (que exercia maior influência na vazão de recirculação) até atingir a pressão e vazão de recirculação desejadas.

Então, o registro de ar era aberto e lentamente o ar ocupava o volume da câmara definido pelo nível de instalação das ventosas, localizadas a 39 cm do fundo da câmara (ver Figuras 7 e 8). As ventosas tinham o propósito de tanto expulsar o excesso de ar da câmara de saturação, como de manter o nível d'água dentro da câmara constante. Quando o colchão de ar era formado, as micro-bolhas já podiam ser visualizadas na câmara de flotação. Esperava-se 1 hora para que processo entrasse em regime e começassem a ser realizadas as coletas de amostras. Nos ensaios com controle de pH, eram utilizados ácido clorídrico e soda cáustica. O acompanhamento de pH era realizado através de pH-metro portátil da Micronal com eletrodo na primeira câmara de floculação. Vale salientar que o pH de entrada variava muito durante o ensaio (na faixa de 4 até 11, as vezes).

Após a entrada em regime do processo, eram retiradas amostras na entrada e saída do reator, de 15 em 15 minutos, medidas suas temperaturas, valores de pH e, posteriormente, Sólidos Suspensos Totais (SST), totalizando seis amostras ao longo de 90 minutos. Ao final, alíquotas das amostras de entrada e alíquotas das amostras de saída eram misturadas, compondo as amostras compostas de entrada e de saída. Com essas duas amostras eram realizados os ensaios de DQO e SST, além de temperatura e pH.



- A - Caixa com vertedor 1 para ÁGUA PRETA
- B - Caixa com vertedor 2 para ÁGUA AMARELA
- C - Câmara de mistura rápida
- D e E - Câmaras de floculação em série
- F - Câmara de flotação
- G - Canaleta para remoção do lodo
- H - Caixa com vertedor 3 para medir vazão de saída
- I - Bomba de alta pressão
- J - Câmara de Saturação
- K - Dispositivo de depressurização
- L - Registro de entrada da câmara de saturação
- M - Dispositivo para medir eficiência da Câmara de Saturação

FIGURA 7 - Esquema da unidade de FAD com escoamento contínuo: planta baixa e corte com valores cotados em cm - s/escala

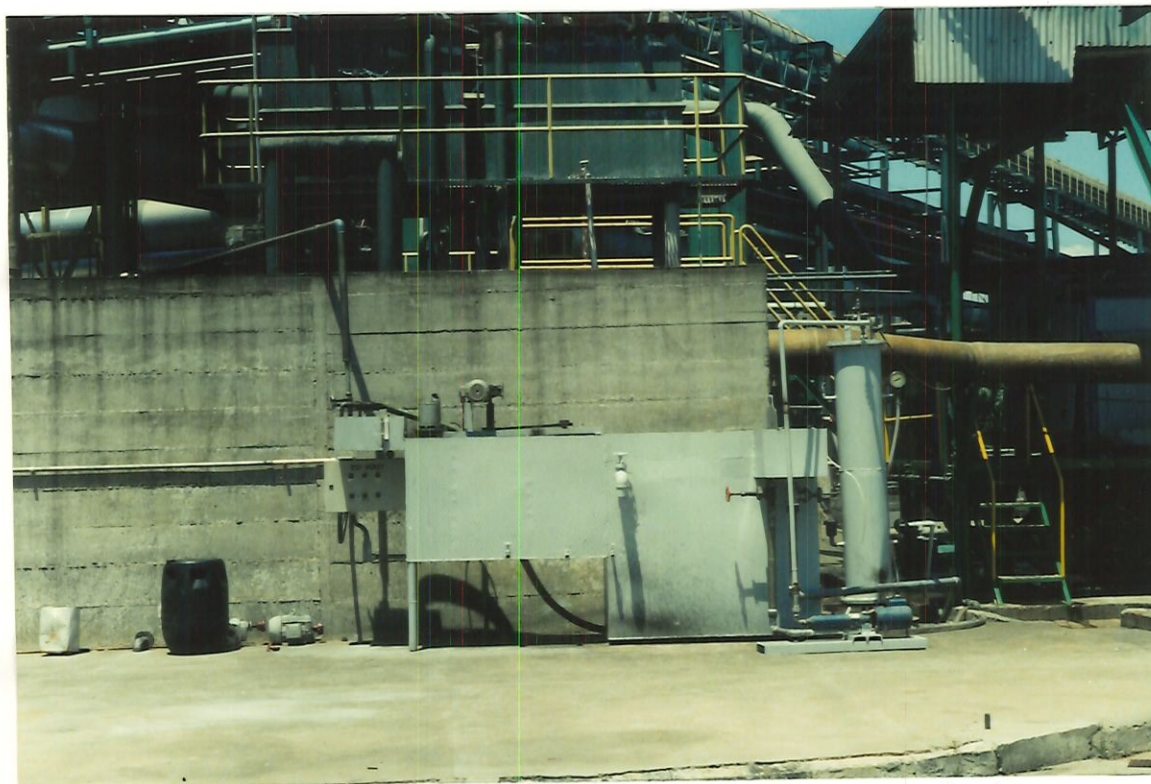


FIGURA 8 - Foto da unidade piloto de FAD no local de funcionamento.

Para cada ensaio foi variada a Taxa de Aplicação Superficial (TAS, em  $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ ) e a vazão de recirculação. A TAS é definida como a vazão total (vazão de saída do vertedor 3) dividida pela área superficial útil da câmara de flotação, e a vazão de recirculação corresponde a porcentagem desta vazão que foi saturada com ar na câmara de saturação. As TAS aplicadas foram 120, 160 e 200  $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$  e as vazões de recirculação aplicadas foram entre 15 e 145%.

Os ensaios com cloreto férrico foram realizados na taxa de 160  $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$  (nas dosagens de 50 e 100 mg/l) e na taxa de 200  $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$  (na dosagem de 50 mg/l).

Para a dosagem de cloreto férrico foi empregado dosador de nível constante. Com as amostras compostas obtidas nos ensaios em que foi aplicado cloreto férrico foram realizadas determinações de sulfatos, sulfetos, DQO e SST.

Com os resultados dos ensaios foram construídos curvas relacionando-se a variação de SST no afluente e efluente, eficiência de remoção de sólidos suspensos totais, a razão A/S e o valor do pH com o tempo de ensaio.

Ao final de cada ensaio era também coletada uma amostra do lodo flotado para medir o seu teor de sólidos.

A partir dos ensaios realizados foi possível verificar, entre outras coisas, a: i) influência da quantidade de ar fornecida na eficiência do processo (razão A/S); ii) influência da taxa de aplicação superficial (TAS) no desempenho da unidade piloto de FAD; e iii) estimativa da umidade do lodo flotado.

#### 4.5- Monitoramento dos ensaios

Todas as análises e determinações foram realizadas no laboratório da Citrosuco e, quando necessário, no laboratório de Hidráulica e Saneamento (SHS) da Escola de Engenharia de São Carlos - USP. Convém salientar que o laboratório da Citrosuco estava equipado e a disposição deste autor para fazer todas as determinações e análises propostas neste trabalho.

##### 4.5.1- Determinações físico-químicas

As determinações físico-químicas foram realizadas de acordo com Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1992).

Temperatura: para as medidas de temperatura necessárias durante o trabalho foi utilizado termômetro comum com filamento de álcool ou de mercúrio.

pH: as determinações de pH foram obtidas através de pH-metro digital Micronal, modelo B222.

Demanda Química de Oxigênio (DQO): o método utilizado foi o de refluxo e digestão em  $K_2Cr_2O_7$  em meio ácido quente.

Sólidos Suspensos Totais (SST): foi determinado através de filtração da amostra em membrana apropriada e pesagem das mesmas secas antes e depois da filtração.

DBO<sub>5</sub>: foi determinada através de incubação, sob condições específicas, da amostra num frasco hermeticamente fechado, por um tempo específico (5 dias). O Oxigênio Dissolvido (OD) é medido antes e depois da incubação. A DBO é a diferença entre o OD final e o OD inicial.

Sulfatos: o método utilizado foi o turbidimétrico.



#### 4.5.2- Determinações de Proteínas, Carboidratos e Lipídeos

O lodo gerado na unidade piloto de FAD (Ensaio 16 e 17) foi coletado para análises nutricionais. Foram retiradas duas amostras de lodo, onde foram determinadas as quantidades de proteínas, carboidratos e lipídeos presentes. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

A metodologia utilizada para essa caracterização foi informada por BLUNDI (1995)<sup>14</sup> e é semelhante a usada por JUDICE (1991) em seu trabalho. No trabalho realizado por JUDICE (1991) o objetivo era determinar a composição extracelular de lodos ativados (proteínas, lipídeos e carboidratos). Para tanto era necessário a remoção ou extração do material extracelular para as determinações. Neste trabalho não foi necessária essa extração pois o objetivo era a determinação da composição do lodo proveniente da unidade piloto de FAD como um todo, sendo necessária, portanto, uma pequena modificação (recomendação de BLUNDI (1995)<sup>14</sup>) na metodologia usada por JUDICE (1991).

Então, para cada amostra de lodo estudada, diluiu-se cerca de 1,0 g de lodo (1,0058g e 1,0063g de lodo dos Ensaios 16 e 17, respectivamente) em 1 litro de água destilada para a formação da solução contendo, em tese, proteínas, carboidratos e lipídeos. Para as determinações de proteínas, carboidratos e lipídeos foi então usada a metodologia usada por JUDICE (1991): para proteínas foi usado o método do micro-biureto; para carboidratos, método do fenol e ácido sulfúrico; e para lipídeos, o método da sulfofosfovanilina.

---

<sup>14</sup> BLUNDI, C. E. (Prof. Dr. Da Escola de Engenharia de São Carlos), Comunicação Pessoal, 1995.

## 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1- Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados das determinações físico-químicas realizadas com vistas à caracterização das águas residuárias estudadas e os resultados obtidos nos ensaios realizados com o flotateste, com a unidade piloto e com a câmara de saturação nos ensaios realizados na Citrosuco Paulista SA.

### 5.2- Caracterização dos afluentes estudados

A Figura 9 mostra o hidrograma realizado a partir dos dados coletados com a água amarela no dia 11/09/94. Esse hidrograma mostra uma contribuição de carga de 20.698 kg DQO/dia (área cinza do gráfico). Esse resultado, levando-se em conta os volumes tratados e suas variações, pouco difere do trabalho realizado por PEREIRA & RIBEIRO (1993) em estágio profissional realizado na própria Citrosuco de Matão. PEREIRA & RIBEIRO (1993) constataram, em seu levantamento, uma contribuição de carga de 23.800 kg DQO/dia para um volume na faixa de 8.500 m<sup>3</sup>/dia de água amarela. A vazão da água amarela, segundo dados fornecidos por AGUIAR (1995)<sup>15</sup>, varia entre 100 m<sup>3</sup>/h e 500 m<sup>3</sup>/h.

O volume de água preta pode ser estimado a partir da quantidade de caixas de laranjas processadas por dia. Segundo PEREIRA & RIBEIRO (1993) uma quantidade de 254.310 caixas de laranjas processadas em um dia representou uma vazão de 1816 m<sup>3</sup>/dia de água preta e uma carga orgânica de 22.749 kg DQO/dia. A vazão da água preta, segundo AGUIAR (1995)<sup>15</sup>, varia entre 30 m<sup>3</sup>/h e 100 m<sup>3</sup>/h, tendo como Moda (valor que mais se repete) o valor de 100 m<sup>3</sup>/h. É bem verdade que, dependendo do dia e da hora (segunda-feira pela manhã, por exemplo), esta vazão pode ser nula.

---

<sup>15</sup>AGUIAR, V. R. (Citrosuco -Matão). Comunicação pessoal. 1995.

A Tabela 10 mostra algumas características físico-químicas levantadas durante os ensaios. A temperatura média da água amarela, 39°C, apresentou-se bem mais amena que a temperatura média da água preta, 59°C. A mistura das águas, durante os ensaios com a unidade piloto de FAD, produziu uma água com uma temperatura média em torno de 41°C. As temperaturas encontradas estão de acordo com àquelas de LIMA (1993). A água amarela, todavia, se apresentou mais quente, talvez devido a localização da piloto (local muito quente) e estão mais de acordo com as levantadas por SOUZA (1980).

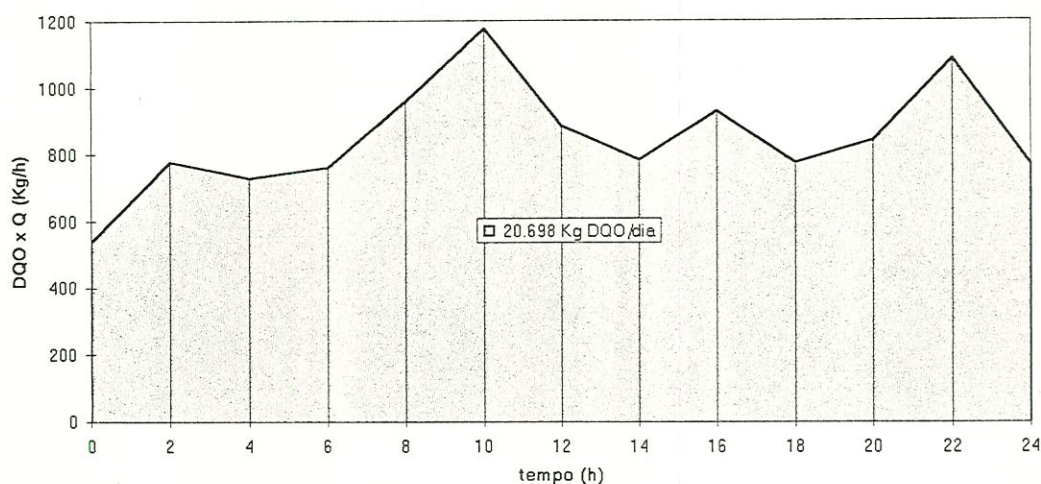


FIGURA 9 - Hidrograma da Água Amarela representando a carga sólida do dia 11/09/94 na Indústria Citrusuco Paulista (Matão-SP)

TABELA 10 - Algumas características físico-químicas da água amarela e da água preta - Citrusuco (Matão-SP) -1995

PARÂMETROS	ÁGUA AMARELA	ÁGUA PRETA
T (°C)	37,0 a 42,5	40,0 a 61,0
pH	4,2 a 12,0	3,0
DQO média (mg/l)	2600	8000
DBO <sub>5</sub> média (mg/l)	1300	5500
SST médio (mg/l)	260	2500

O valor do pH das águas estudadas variou de acordo com o processo produtivo. Durante a lavagem dos equipamentos, por exemplo, o pH da água amarela



aumentava, alcançando, durante o período de monitoramento, o valor de 12. O aumento do pH era acompanhado pela mudança de cor da água amarela, que se tornava alaranjada. Quando o pH se tornava ácido, por outro lado, a água amarela apresentava uma cor creme. Outro fator que deve ser salientado é que a mudança de pH era, quase sempre, brusca (aumentando de 7,0 a 11,0, por exemplo, em menos de uma hora). Essas alterações bruscas de pH ocorrem devido a falta de um tanque de equalização na indústria. O valor do pH da água preta, entretanto, se apresentava mais constante. Geralmente ácido, com um valor médio igual a 3, o pH oscilou entre 1,2 e 4,0 durante o período de monitoramento. As variações, porém, eram menos bruscas. Esses valores estão de acordo OUNO et al. (1983)<sup>16</sup> apud LIMA (1993).

Os valores médios de DQO encontrados (ver Tabela 10) são muito próximos daqueles encontrados por LIMA (1993), (2500 mg/l para a água amarela e entre 5000 mg/l a 15000 mg/l para a água preta), em trabalho realizado na mesma indústria cítrica pesquisada (Citrosuco - Matão/SP). Um fator que deve ser salientado é que os valores levantados, assim como as vazões, variaram em função do horário e do dia em que foram realizadas as amostras analisadas. Assim como no caso do pH, mais uma vez, faz falta um tanque de equalização. O valor da DQO da água preta (5.500 mg/l) apresentou-se bem maior do que aquele observado na água amarela (2.600 mg/l).

Os valores de DBO<sub>5</sub> apresentados na Tabela 10 estão na faixa dos encontrados por SOUZA (1980) e LIMA (1993). O valor da DBO<sub>5</sub> da água amarela apresentou-se, em média, cerca de 4 vezes menor do que o encontrado na água preta.

Uma das características físico-químicas estudadas de maior interesse neste trabalho, foi a quantidade de Sólidos Suspensos Totais - SST - presentes nas águas residuárias. As águas amarela e preta apresentavam características um pouco distintas em relação a este parâmetro. Os sólidos suspensos presentes na água amarela, por exemplo, eram constituídos principalmente de bagacilho de laranja (pequenos pedaços de casca, alvéolos rompidos da polpa e sementes), enquanto que, os da água preta eram compostos principalmente de bagacilho de cana-de-açúcar

---

<sup>16</sup>OUNO, R. O. et al. apud LIMA (1993). *Tratamento de despejos líquidos das indústrias de suco cítrico*. São Paulo, CETESB, DCON-1, 1983.

(material usado nas caldeiras como combustível) e cinzas (responsável pela cor da água). Como pode ser visto (na Tabela 10), a quantidade de SST na água preta é cerca de 10 vezes a da água amarela. A esse respeito, vale citar que um dos grandes problemas encontrados no tratamento existente na Citrosuco - Matão/SP, era a presença, em grande quantidade, de sólidos suspensos no sistema de lagoas, grande parte dos quais flotavam espontaneamente, provocando quedas significativa no desempenho das lagoas, além de sérios problemas operacionais e estéticos.

### 5.3- Ensaio realizados com o Flotateste

Na Tabela 11 pode ser visto o resumo dos resultados dos ensaios realizados com o flotatestes. Os ensaios foram realizados com duas amostras de águas. Com a amostra 1 foram realizados seis ensaios e com a amostra 2, onze.

TABELA 11 - Resumo dos resultados dos ensaios realizados com o flotatestes

Data	Amostra	Dosagem de Cloreto Férrico (mg/l)	Dosagem de Cal (mg/l)	SST <sub>0</sub> (mg/l)	T (°C)	Remoção média de SST (%)
11/07/94	1	0	0 a 30	472	16	95,0
14/09/94	2	0	0 a 20	762	28	73,6
22/09/94	2	0	0 a 50	777	28	76,3
12/07/94	1	10	0 a 40	506	16	92,6
23/09/94	2	10	0 a 40	804	26	88,0
19/07/94	1	20	0 a 40	316	17	95,8
19/08/94	2	20	0 a 40	650	21	70,4
23/09/94	2	20	0 a 30	804	26	84,0
11/08/94	2	30	0 a 40	720	22	81,1
18/08/94	2	30	50 a 80	708	19	70,3
06/07/94	1	40	0 a 20	558	23	75,2
07/07/94	1	40	30 a 50	570	22	92,7
12/08/94	2	40	0 a 40	662	17	64,1
16/08/94	2	40	30 a 80	616	21	62,4
05/07/94	1	50	0 a 40	460	23	95,6
14/09/94	2	50	0 a 30	762	20	73,6
15/09/94	2	100	0 a 40	620	21	82,0

Na Figura 10 são apresentados os resultados de eficiência de remoção de sólidos suspensos totais (SST) obtidos nos ensaios realizados variando-se apenas o pH da água residuária composta com solução de cal, sem o emprego de coagulante (cloreto férrico). Para esse tipo de ensaio foram efetuadas três baterias de testes em datas diferentes (11/07/94; 22/09/94 e 14/09/94). Embora realizados em datas diferentes, utilizou-se em tais ensaios, a mesma composição e águas residuárias, ou seja, 160 ml de água preta misturada a 340 ml de água amarela. Observa-se que a para a água ensaiada em 11/07/94, a flotação apresentou excelentes resultados de remoção de SST para toda a faixa de pH ensaiada (7,2 a 8,7), com remoções variando de 93,9% a 95,6% (com valor de SST na água composta igual a 472 mg/l). No dia 22/09/94 foi realizada uma bateria de testes numa ampla faixa de pH (4,9 a 7,4), obtendo-se remoção máxima de SST para pH entre 5,5 e 5,9 (85,7% a 84,6%), para SST na água composta igual a 752 mg/l. Finalmente, os testes efetuados em 14/09/94 (SST na água composta igual a 762 mg/l), apresentaram resultados extremamente parecidos com os de 22/09/94.

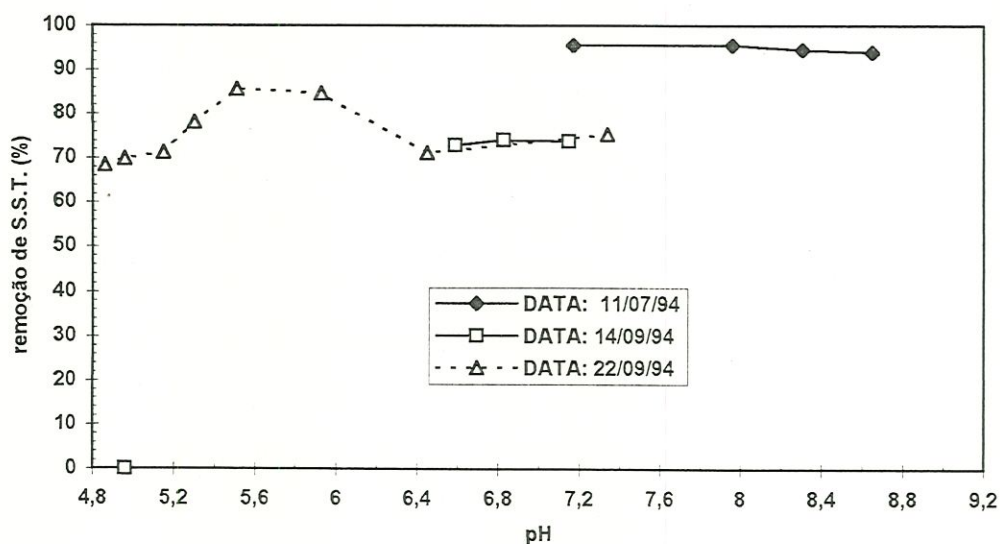


FIGURA 10 - Influência do pH de coagulação na eficiência de remoção de SST por flotação, para dosagem de Cloreto Férrico igual a 0 mg/l.

Na Figura 11 são apresentados os resultados de duas baterias de testes (efetuados em datas diferentes) nos quais fixou-se a dosagem de 10 mg/l de cloreto férrico e variou-se o valor do pH (entre 5,2 a 8,9). O valor de SST na água composta

em 12/07/94 era de 506 mg/l e em 23/09/94 de 804 mg/l. Verifica-se que em toda a faixa de pH estudada a flotação apresentou bons resultados (82,0% a 98,4% de remoção de SST), com máxima remoção para pH igual 8,6.

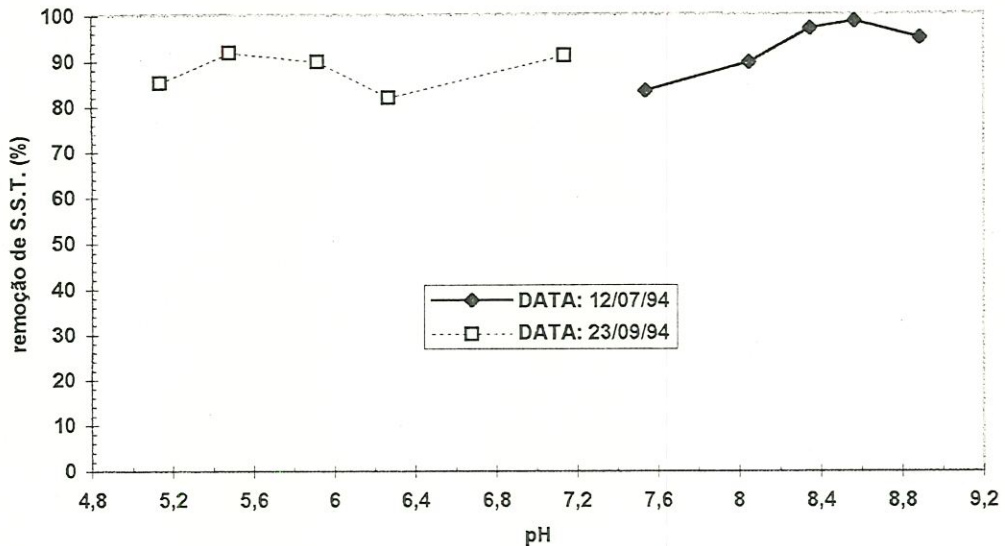


FIGURA 11 - Influência do pH de coagulação na eficiência de remoção de SST por flotação, para dosagem de Cloreto Férrico igual a 10 mg/l.

Os resultados obtidos para uma dosagem de cloreto férrico igual a 20 mg/l, para valores de pH entre 5,1 e 8,6, são mostrados na figura 12. Foram realizados ensaios em três datas diferentes (SST em 19/07/94 era de 316 mg/l; em 19/08/94 de 650 mg/l e em 23/09/94 de 804 mg/l). Verifica-se que os ensaios de 19/07/94, para a mesma faixa de pH (6,8 a 7,9), apresentaram resultados de remoção de SST (acima de 94,2%) bastante superiores aos obtidos nos ensaios de 19/08/94 (entre 55,6% e 83,4% de remoção de SST). Para 20 mg/l de cloreto férrico, o melhor resultado foi obtido entre os ensaios de 19/07/94 com pH igual a 7,7 (97,5% de remoção de SST).

Na Figura 13 são apresentados os resultados dos ensaios realizados com dosagem de 30 mg/l de cloreto férrico. Para os testes efetuados em 11/08/94 o melhor resultado foi de 89,8% de remoção de SST, para pH igual a 6,0 (SST na água residuária composta de 720 mg/l). Para os ensaios realizados em 18/08/94 (SST na água composta igual a 708 mg/l) o melhor resultado foi de 76,6% de remoção, para pH igual a 7,4.

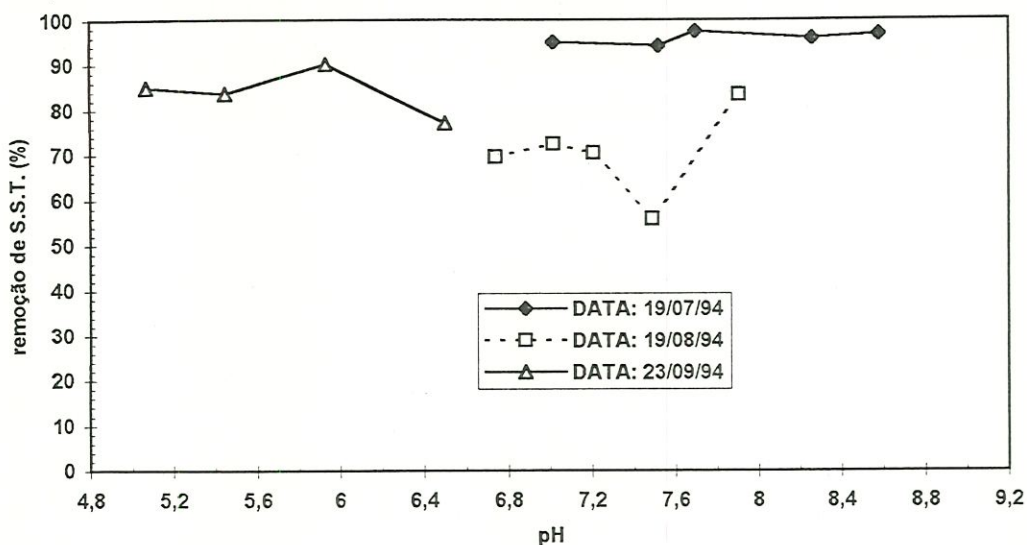


FIGURA 12 - Influência do pH de coagulação na remoção de SST por flotação, para dosagem de Cloreto Férrico igual a 20 mg/l.

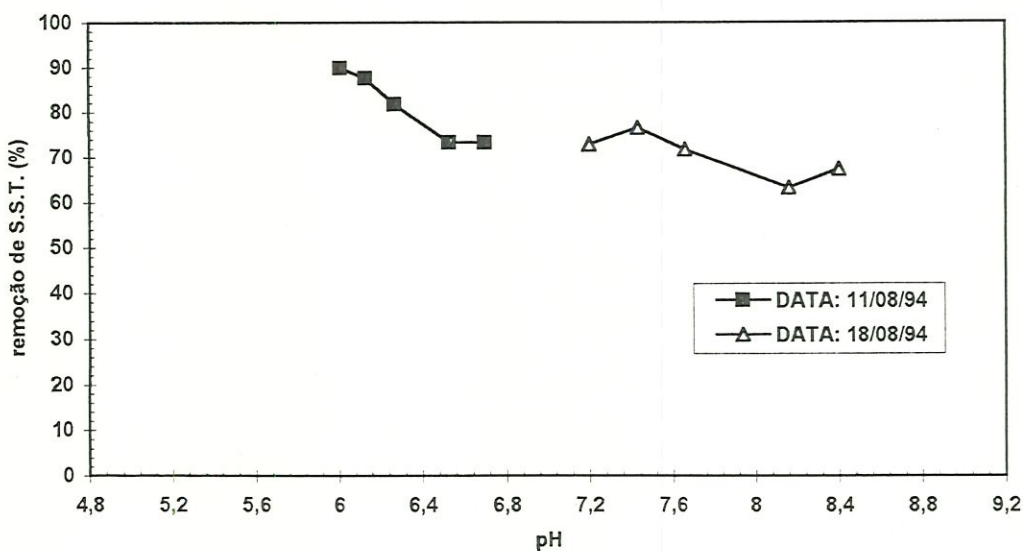


FIGURA 13 - Influência do pH de coagulação na remoção de SST por flotação, para dosagem de Cloreto Férrico igual a 30 mg/l.

Na Figura 14, pode-se observar que, para a dosagem de cloreto férrico de 40 mg/l, dentre os testes efetuados em 06/07/94 (SST na água composta igual a 558 mg/l), aquele realizado com pH igual a 7,2 apresentou o melhor resultado de remoção de SST (96,1%). A bateria de ensaios realizados de 07/07/94 (SST na água composta igual a 476 mg/l) apresentou melhor resultado para pH igual a 8,3 (96,1).

Os ensaios realizados em 12/08/94 (SST na água composta igual a 662 mg/l) e em 16/08/94 (SST na água composta igual a 616 mg/l) apresentaram resultados inferiores de remoção de SST em comparação aos anteriores, para a mesma faixa de pH.

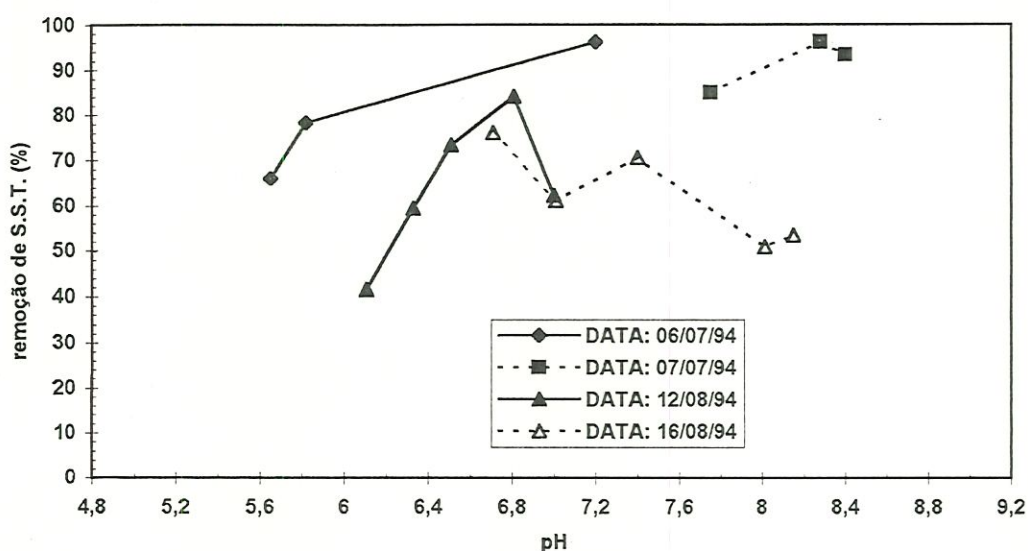


FIGURA 14 - Influência do pH de coagulação na remoção de SST por flotação, para dosagem de Cloreto Férrico igual a 40 mg/l.

Na Figura 15 são apresentados os resultados referentes à dosagem de 50 mg/l de cloreto férrico, observando-se eficiências extremamente elevadas de remoção de SST para os ensaios do dia 05/07/94 (SST na água composta igual a 460 mg/l), na faixa de pH entre 6,3 e 6,8 (eficiência de remoção de SST acima de 99,0%). Para os testes efetuados em 14/09/94 as maiores eficiências de flotação foram para valores de pH entre 7,0 e 7,4 (eficiência em torno de 85,0% de remoção de SST).

Observando-se a Figura 16, onde são mostrados os resultados dos ensaios com dosagem de 100 mg/l de cloreto férrico, constata-se que, para faixa de pH estudada (entre 6,0 e 6,8), o melhor resultado foi obtido para pH em torno de 6,8, com 93,6% de eficiência de remoção de SST.

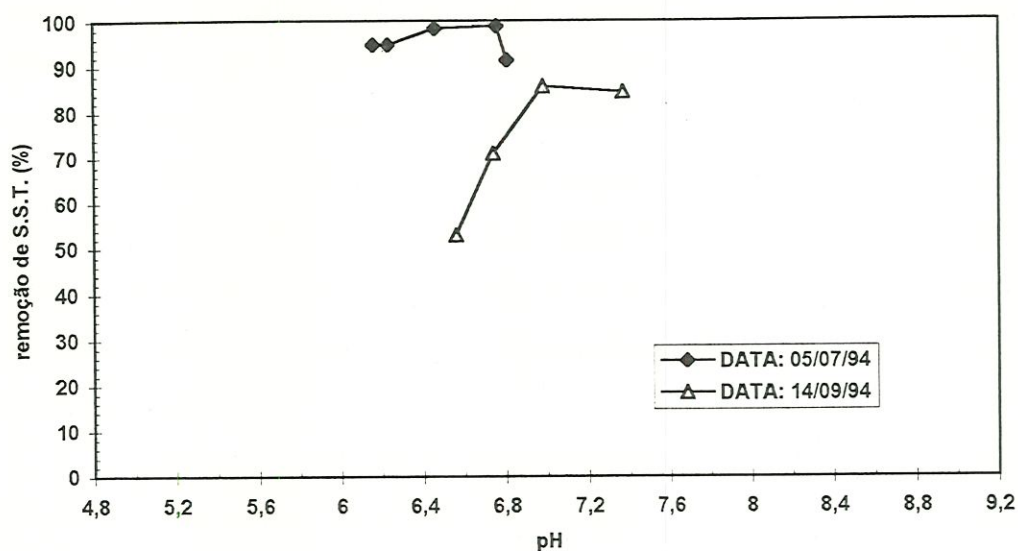


FIGURA 15 - Influência do pH de coagulação na remoção de SST por flotação, para dosagem de Cloreto Férrico igual a 50 mg/l.

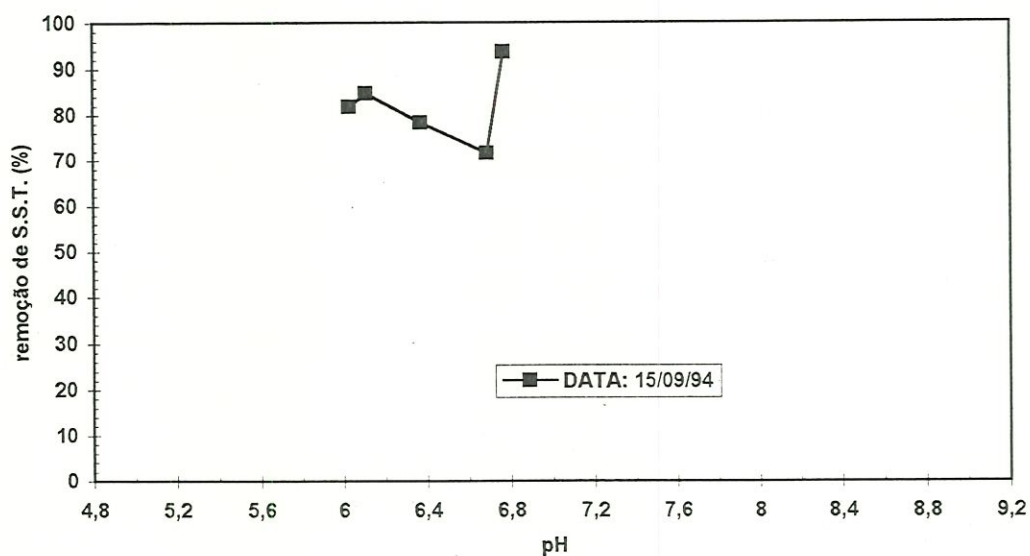


FIGURA 16 - Influência do pH de coagulação na remoção de SST por flotação, para dosagem de cloreto férrico igual a 100 mg/l.

De maneira geral, a análise dos resultados demonstra que a flotação apresentou bons resultados de remoção de SST, mesmo sem a aplicação de cloreto férrico como coagulante, apenas controlando-se o valor de pH (ver figura 10). Para dosagens relativamente pequenas de cloreto férrico como coagulante, entre 10 e 50 mg/l, dependendo da água em estudo, verificou-se eficiências bastantes elevadas de

remoção de SST em determinadas faixas de valores de pH de coagulação. Sendo que, a dosagem de 50 mg/l de coagulante, para valores de pH em torno de 6,8, forneceu os valores mais elevados de remoção de SST por flotação, aproximando-se de 99,0%.

Deve-se salientar ainda que os resultados mostraram uma relação grande entre o desempenho da flotação e a qualidade da água residuária, pois ensaios realizados com iguais dosagens de coagulante, na mesma faixa de pH mas com amostras diferentes (amostras 1 e 2), apresentaram eficiências consideravelmente díspares (ver Figuras 10 e 12).

Com base em tais resultados, foram programados e realizados os ensaios com a instalação piloto de flotação por ar dissolvido com escoamento contínuo, construída pela Citrosuco Paulista S/A especificamente para o presente estudo.

#### **5.4- Ensaios realizados com a câmara de saturação da unidade piloto de FAD**

Os ensaios realizados com a câmara saturação da unidade piloto são mostrados nas Figuras 17, 18 e Tabela 12. A Figura 17 mostra a variação da concentração de ar seco fornecido,  $S_p$ , que foi dissolvido pela câmara de saturação, na pressão  $P = 4,5 \pm 0,1 \text{ kgf/cm}^2$  ( $440 \pm 10 \text{ kPa}$ ), em função da Taxa de Aplicação Superficial aplicada na câmara de saturação,  $TAS_{CS}$ . É possível constatar, portanto, que  $S_p$  manteve-se constante e igual a 62,3 mg/l na faixa de  $TAS_{CS}$  estudada ( $TAS_{CS}$  entre 250 e 750 m/d).

A Figura 18, por outro lado, mostra a variação linear de  $S_p$  em função da Pressão Relativa,  $P$ , utilizada. Foram realizados ensaios com  $P$  entre a faixa de 335 a 500 kPa. Através de regressão linear, foi encontrada a equação da reta interpolada entre os valores médios ensaiados, de modo que  $S_p$  em mg/l é dado por:

$$S_p = 13,312 P \quad (16)$$

com  $P$  em  $\text{kgf/cm}^2$  e  $S_p$  em mg/l.



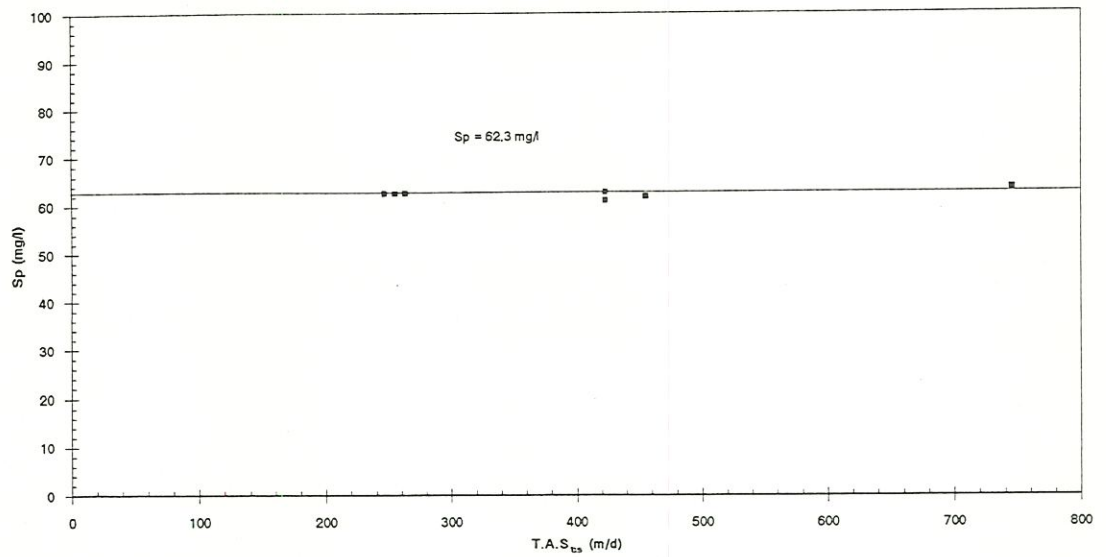


FIGURA 17 - Variação de Ar Seco fornecido pela câmara de Saturação,  $S_p$ , em função das TAScs aplicadas na pressão de  $440 \pm 10$  kPa .

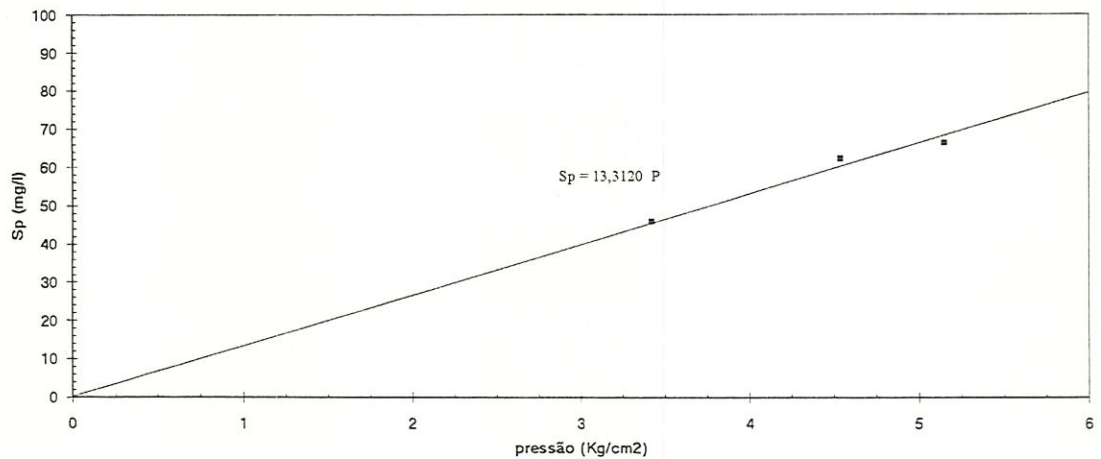


FIGURA 18 - Variação de Ar Seco fornecido pela câmara de Saturação,  $S_p$ , em função da Pressão da câmara de saturação. Desvio padrão,  $S_d = 2,094$ ,  $T = 40 \pm 2$  °C .

TABELA 12 - Resultados dos ensaios realizados com a Câmara de Saturação

DATA	h (cm)	Q (l/s)	V <sub>m</sub> (ml)	V <sub>A</sub> (ml)	V <sub>AR</sub> (ml)	S <sub>V</sub> V <sub>AR</sub> /V <sub>H2O</sub>	P <sub>CSaturação</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )	T (°C) Água	P <sub>atm</sub> (mmHg)	T (°C) Ambiente	P <sub>V</sub> (mmHg)	Sp'	S <sub>P</sub> (mg/l) (Ar Seco)
25/04/95	3,05	0,17685	131,10	124,15	6,95	0,0560	4,50	41,0	699,6	-	59,59	1016,51	53,89
	3,05	0,17685	129,30	123,05	6,25	0,0508	4,50	41,5	-	-	60,92	1007,81	48,71
	3,05	0,17685	130,55	123,30	7,25	0,0588	4,50	41,1	-	-	59,59	1018,90	56,58
27/04/95	5,60	0,63342	130,2	121,65	8,55	0,0705	4,45	41,0	-	-	59,59	1030,28	64,17
	5,60	0,63342	131,2	123,00	8,20	0,0667	4,45	41,0	-	-	59,59	1026,80	67,66
	5,50	0,60991	132,6	124,25	8,30	0,0668	4,45	41,0	-	-	59,59	1026,93	63,41
	5,55	0,62166	134,4	125,70	8,30	0,0660	4,47	41,0	-	-	59,59	1029,25	64,84
	5,55	0,62166	133,9	125,45	8,45	0,0674	4,48	41,0	-	-	59,59	1027,46	63,56
	5,50	0,60991	134,9	126,55	8,35	0,0660	4,50	41,1	-	-	59,59	1025,81	63,50
28/04/95	3,35	0,21536	132,5	124,40	8,10	0,0651	4,50	41,0	-	-	59,59	1025,30	62,68
	3,35	0,21536	137,1	129,15	7,85	0,0616	4,55	41,0	-	-	59,59	1021,88	59,26
	3,35	0,21536	132,7	124,60	8,10	0,0650	4,60	41,0	-	-	59,59	1025,20	62,58
	3,30	0,20867	132,8	124,70	8,10	0,0650	4,55	41,0	-	-	59,59	1025,15	62,53
	3,25	0,20208	133,6	125,45	8,15	0,0650	4,60	41,0	-	-	59,59	1025,16	62,54
02/05/95	4,20	0,34623	135,8	128,05	7,75	0,0605	4,50	39,0	-	-	53,56	1037,11	62,71
	4,20	0,34623	133,8	125,65	8,15	0,0650	4,60	40,5	-	-	57,83	1029,52	61,01
	4,20	0,34623	134,6	126,55	8,05	0,0636	4,60	41,5	-	-	60,92	1020,10	59,19
03/05/95	4,35	0,37276	134,0	125,95	8,05	0,0639	4,53	41,0	-	-	59,59	1024,15	61,53
	4,35	0,37276	137,0	129,40	7,60	0,0587	4,53	41,0	-	-	59,59	1019,16	56,54
	4,35	0,37276	134,4	126,30	8,10	0,0641	4,50	41,0	-	-	59,59	1024,36	61,74
10/05/95	5,15	0,55632	129,1	123,75	5,35	0,0432	3,45	38,0	700,0	18	49,15	1031,10	42,73
11/05/95	4,75	0,44837	132,4	126,95	5,45	0,0429	3,42	39,8	699,5	27,4	53,56	1061,04	53,99
	4,70	0,43846	131,8	126,35	5,45	0,0431	3,40	40,5	699,8	41,0	57,83	1008,83	41,15
12/05/95	3,90	0,29634	132,2	123,65	8,55	0,0691	5,15	42,0	699,5	29,4	62,17	1021,62	66,07
	3,90	0,29634	135,4	126,65	8,75	0,0670	5,15	41,0	699,4	30,0	59,59	1028,81	66,48
	3,90	0,29634	134,5	127,70	8,80	0,0700	5,13	41,0	699,4	34,5	59,59	1029,69	50,31

Onde: V<sub>m</sub>, V<sub>A</sub> e V<sub>AR</sub> são os volumes da amostra, da água e do ar respectivamente e P<sub>CSaturação</sub> é a pressão da Câmara de Saturação.

A eficiência de uma câmara de saturação, segundo EDZWALD (1995), pode atingir 60 à 70% para câmara de saturação sem recheio e 90% para câmara de saturação com recheio. A câmara de saturação usada neste trabalho forneceu Ar Seco,  $S_p$ , para uma pressão de  $4,5 \text{ kg/cm}^2$  (441,27 kPa) e Temperatura de  $40^\circ \text{ C}$ , a quantidade de 62,3 mg/l, representando cerca de 81% da estabelecida por REES et al. (1980), (aproximadamente 76 mg/l) em câmara de saturação com recheio. A câmara de saturação usada, portanto, possui nível de eficiência razoável, considerando que a mesma não possuía recheio.

## **5.5- Ensaios realizados com a unidade piloto de FAD**

### **5.5.1 - Considerações Iniciais**

Os resultados dos ensaios são apresentados em forma de tabelas (Tabelas 13, 14 e 15) e figuras (Figuras 19 a 41) que permitem visualizar as relações entre as variáveis. As figuras 19 a 38 mostram a eficiência na remoção de SST em função da Taxa de Aplicação Superficial, TAS, e da recirculação utilizada. As figuras mostram também a variação do pH e da razão A/S. Na Tabela 13 apresenta-se um resumo dos resultados dos ensaios realizados com a instalação piloto.

Antes de mostrar os resultados dos ensaios propostos na Metodologia, convém comentar os ensaios 17 e 18, onde foi usado diferente proporção na mistura de águas preta e amarela. O ensaio 18 realizado apenas com a água preta (ver Tabela 13) não apresentou resultados satisfatórios utilizando a FAD. Entretanto, não é possível afirmar que a “água preta” não pode ser tratada separadamente, pois para isso, deveriam ter sido realizados mais ensaios variando o pH ou mesmo investigando o uso de outros coagulantes e floculantes (polímeros sintéticos, por exemplo). Além disso, a mudança da proporção das águas misturadas, utilizando 50% de cada água, pelo menos no ensaio realizado (Ensaio 17), não trouxe nenhum benefício pois a eficiência de remoção de SST diminuiu (57,5% de remoção de SST), conforme mostrado na Tabela 13. É bem verdade que outros fatores podem ter influenciado neste resultado. O Ensaio 17, por exemplo, registrou a menor razão A/S ( $A/S = 0,0153$ ) entre todos os ensaios, apesar de não ter sido esta a intenção (ver Tabela 13). Um problema encontrado em todos os ensaios era a mudança da qualidade da água

misturada na entrada da unidade. No ensaio 17, além da massa de sólidos em suspensão (S) ter sido alta, ela foi acompanhada por uma redução da recirculação planejada (A), diminuindo a relação A/S.

Não ficou claro nos ensaios a relação entre pH e remoção de SST. Isto por um lado é ruim, pois dificulta o entendimento do processo e sua otimização. Por outro lado, resultados muito bons foram alcançados sem o seu controle e em faixas diferentes. O Ensaio 1 (pH em torno de 9,0), alcançou remoção média de 86,7%, sem o uso de cloreto férrico (ver Figura 20). O Ensaio 15 (pH em torno de 4,4), alcançou 97,6 % de remoção, com dosagem de cloreto férrico de 50 mg/l (ver Figura 37).

Na Tabela 13 é apresentado resumo de todos os resultados dos ensaios realizados na unidade piloto de FAD, ou seja, com ou sem aplicação de coagulante (Cloreto Férrico).

#### **5.5.2 - Resultado dos ensaios realizados com a instalação piloto sem aplicação de cloreto férrico (Ensaio nº 1 a 12)**

Os ensaios sem aplicação de cloreto férrico variaram bastante em função da TAS e recirculação. Os melhores resultados foram alcançados para TAS de 120 m/d.

Na figura 19 podem ser vistos os resultados dos ensaios, em relação a eficiência de remoção de SST, para a TAS de 120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d (ensaio 1 a 4) com suas respectivas recirculações. A variação da eficiência de remoção de SST foi de 70,8% no ensaio 4 (120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d e 145% de recirculação) à 86,7% no ensaio 1 (120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d e 40% de recirculação), com uma remoção média de 79,9%. A menor eficiência verificada para a recirculação de 145% foi muito provavelmente devido a diminuição da eficiência do registro de agulha usado para reduzir a pressão e mistura da recirculação pressurizada. Para vazões elevadas de recirculação, verificou-se visualmente que tal dispositivo provocava ocorrência de aglutinação excessiva das microbolhas na região de mistura do afluente com a vazão de recirculação. Esse fenômeno resultava na geração de bolhas de tamanho médio inadequado para o bom desempenho da flotação. A razão A/S variou de 0,0514 (ensaio 1) a 0,2358 (ensaio 4).

Nas figuras 20, 21, 22 e 23 é mostrada a variação dos principais parâmetros estudados ao longo dos ensaios 1, 2, 3 e 4, respectivamente (SST, remoção de SST, A/S e pH).

A figura 20, referente ao ensaio 1 (TAS =  $120 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$  e 40% de recirculação), mostra que houve uma variação muito grande no valor do pH (4,6 - 12) e de SST na água afluyente (142 a  $1720 \text{ mg/l}$ ). A remoção média de SST foi de 86,7%. A razão A/S variou entre 0,0145 e 0,1753, tendo 0,0514 como A/S médio. Observa-se que o valor de SST no efluente, a despeito da grande variação do valor afluyente (de 142 a  $1720 \text{ mg/l}$ ), apresentou pequena variação (de 58 a  $148 \text{ mg/l}$ ). Convém salientar que este foi o melhor ensaio para a Taxa de Aplicação Superficial de  $120 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$  com relação a remoção de SST. Por outro lado, não houve remoção de DQO filtrada.

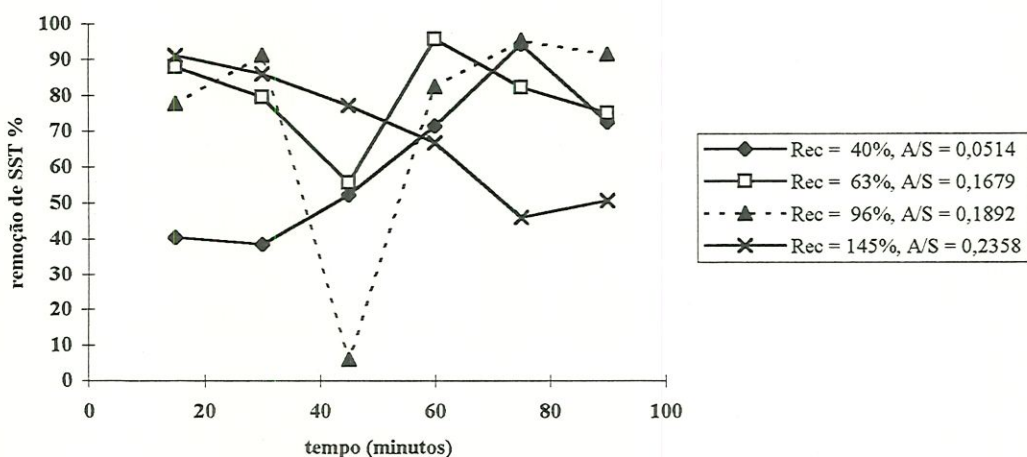


Figura 19 - Resultados obtidos com a instalação piloto de FAD em termos de eficiência na remoção de SST (%) em função do tempo para a TAS de  $120 \text{ m}^3/\text{d}$ , sem aplicação de cloreto férrico (Ensaio 1 a 4).

TABELA 13 - Resumo dos resultados dos ensaios realizados com a unidade piloto de FAD (pressão de saturação em torno de 450 KPa)

ENSAIO	Dosagem de	T.A.S.	Recirculação	T (°C)	Controle	Faixa de	A/S média	DQO <sub>AF</sub> *	DQO <sub>EF</sub> *	Remoção de	SST <sub>AF</sub> *	SST <sub>EF</sub> *	Remoção	Teor de
Nº	Cloreto	(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d)	(%)		de pH	variação de		filtrada	filtrada	DQO	(mg/l)	(mg/l)	de SST	Sólidos do
	Férrico (mg/l)					pH		(mg/l)	(mg/l)	filtrada (%)			(%)	lodo (%)
01	0	120	40	40 ± 2	não	4,6 - 11	0,0514	3600	3600	0,00	485	94	86,7	9,7
02	0	120	63	46 ± 2	sim	5,8 - 6,5	0,1679	3600	3200	11,1	235	44	81,3	14,2
03	0	120	96	45 ± 0,5	sim	5,8 - 6,4	0,1892	4200	3600	14,3	316	60	81,0	12,7
04	0	120	145	42 ± 4	não	5,9 - 9,5	0,2358	5000	4200	16,0	383	112	70,8	10,8
05	0	160	39	46 ± 2	sim	5,9 - 7,0	0,0551	5000	4400	12,0	445	145	67,4	10,2
06	0	160	61	47 ± 2	sim	5,7 - 6,6	0,1036	4400	4000	9,09	368	124	66,3	10,6
07	0	160	87	44 ± 1	sim	6,3 - 6,9	0,2946	4400	4000	9,09	183	23	88,6	11,4
08	0	160	139	46 ± 2	sim	5,6 - 6,9	0,2051	5800	4800	17,2	422	265	37,2	9,9
09	0	200	34	46 ± 1	sim	6,3 - 6,8	0,0489	4000	3800	5,00	436	118	72,9	12,6
10	0	200	55	43 ± 1	sim	6,1 - 6,6	0,1022	3600	3600	0,00	337	76	77,5	13,0
11	0	200	84	44 ± 0,5	sim	5,9 - 6,5	0,1132	4800	4600	4,17	460	190	58,7	11,0
12	0	200	126	44 ± 3	sim	5,9 - 7,2	0,1570	5000	4000	20,0	500	216	56,8	9,8
13	100	160	39	44 ± 1	sim	6,1 - 7,0	0,0335	3000	2800	6,67	733	40	94,5	11,6
14	50	160	39	43 ± 2	sim	6,1 - 6,5	0,0642	3400	2200	35,3	382	58	84,8	12,0
15	50	200	26	42 ± 2	não	4,3 - 4,5	0,0428	2636	2478	5,99	375	9	97,6	9,4
16	50	200	15	53 ± 2	não	4,0 - 7,6	0,0224	3611	2662	26,3	427	20	95,3	6,2
17 <sup>+</sup>	50	200	16	47 ± 2	não	4,3 - 5,0	0,0153	4059	3769	7,14	651	277	57,5	9,0
18 <sup>++</sup>	0	160	39	58 ± 3	não	3,4 - 3,7	0,0524	4877	4850	0,55	468	268	42,7	12,8

<sup>+</sup> : O ensaio 17 foi realizado com 50% de cada água estudada.

<sup>++</sup> : O ensaio 18 foi realizado apenas com água preta.

\* : Resultados referentes à amostras combinadas coletadas ao longo de cada ensaio.

A figura 21 mostra os resultados do ensaio 2 (TAS = 120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d e 63% de recirculação), uma variação de SST afluente entre 162 e 300 mg/l, com uma remoção média de 81,3%. O pH foi mantido numa faixa de 5,8 a 6,5. A razão A/S variou entre 0,1149 e 0,2127, tendo 0,1679 como valor médio. A DQO filtrada média da amostra composta do afluente apresentou valor de 3600 mg/l enquanto que a amostra composta do efluente apresentou valor de 3200 mg/l, resultando em apenas 11,1% de remoção.

A figura 22 mostra os resultados do ensaio 3 (TAS = 120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d e 96% de recirculação), que teve resultados bastantes semelhantes ao ensaio 2, levando-se em conta a remoção média de SST (81,0%). A remoção de DQO filtrada foi de 14,3% para uma DQO afluente de 4200 mg/l.

A figura 23 que representa os resultados do ensaio 4 (TAS = 120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d e 145% de recirculação), mostra uma diminuição na remoção de SST ao longo do ensaio (de 91% para 46%), tendo como valor médio 70,8% de remoção. O pH variou de 5,9 até 9,5 por não ter sido realizado o seu controle. A remoção de DQO filtrada foi a maior para a TAS aplicada (120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d), sendo 16% para uma DQO afluente de 5000 mg/l. A razão A/S variou entre 0,1275 e 0,5312, tendo como valor médio 0,2358.

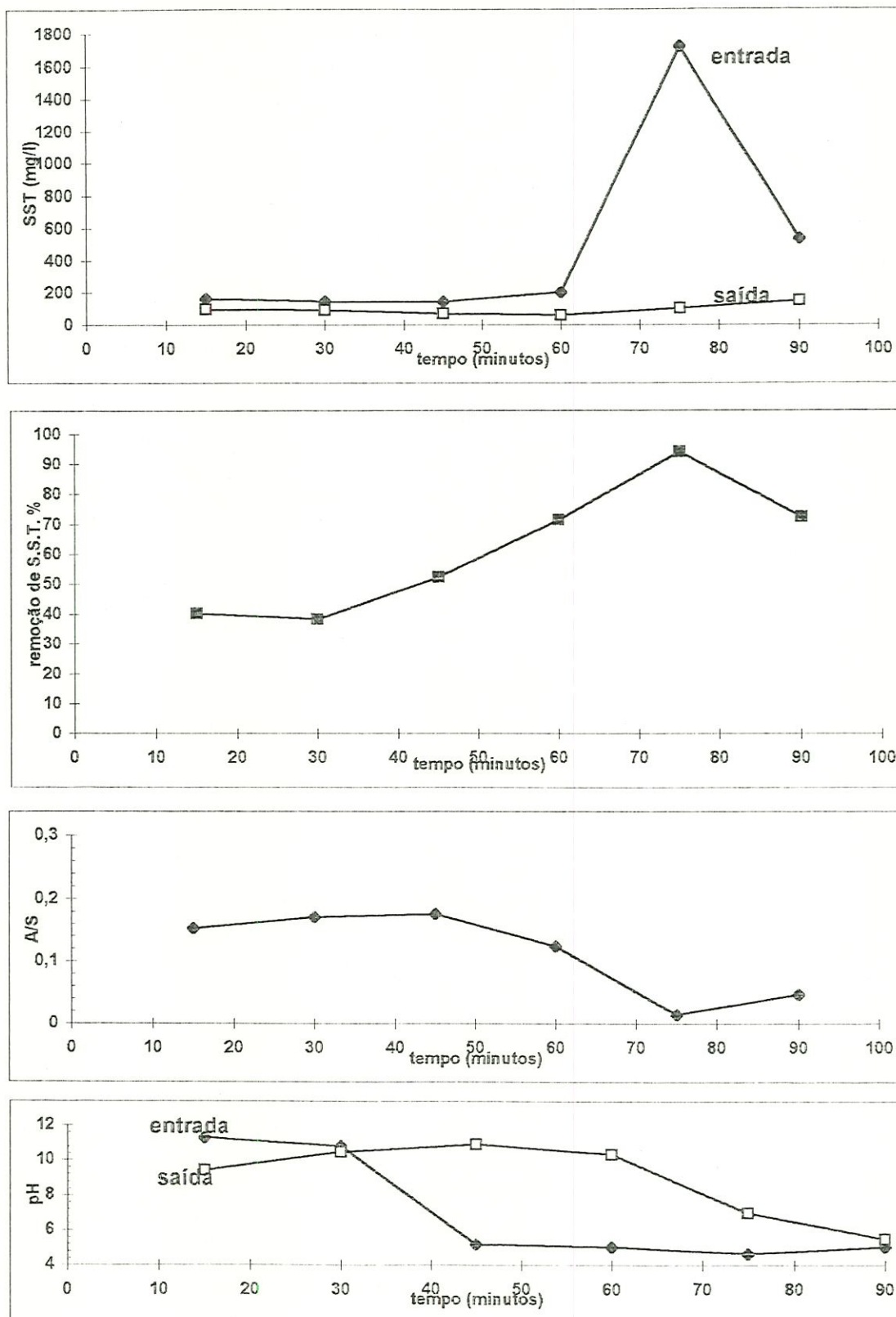


Figura 20 : Resultados obtidos no Ensaio 1 durante o tempo de operação da instalação piloto de flotação com escoamento contínuo, em termos de Sólidos Suspensos Totais (SST), A/S, remoção de SST e pH da mistura. Características do Ensaio: TAS = 120 m/d, 40% de recirculação e A/S médio = 0,0514.



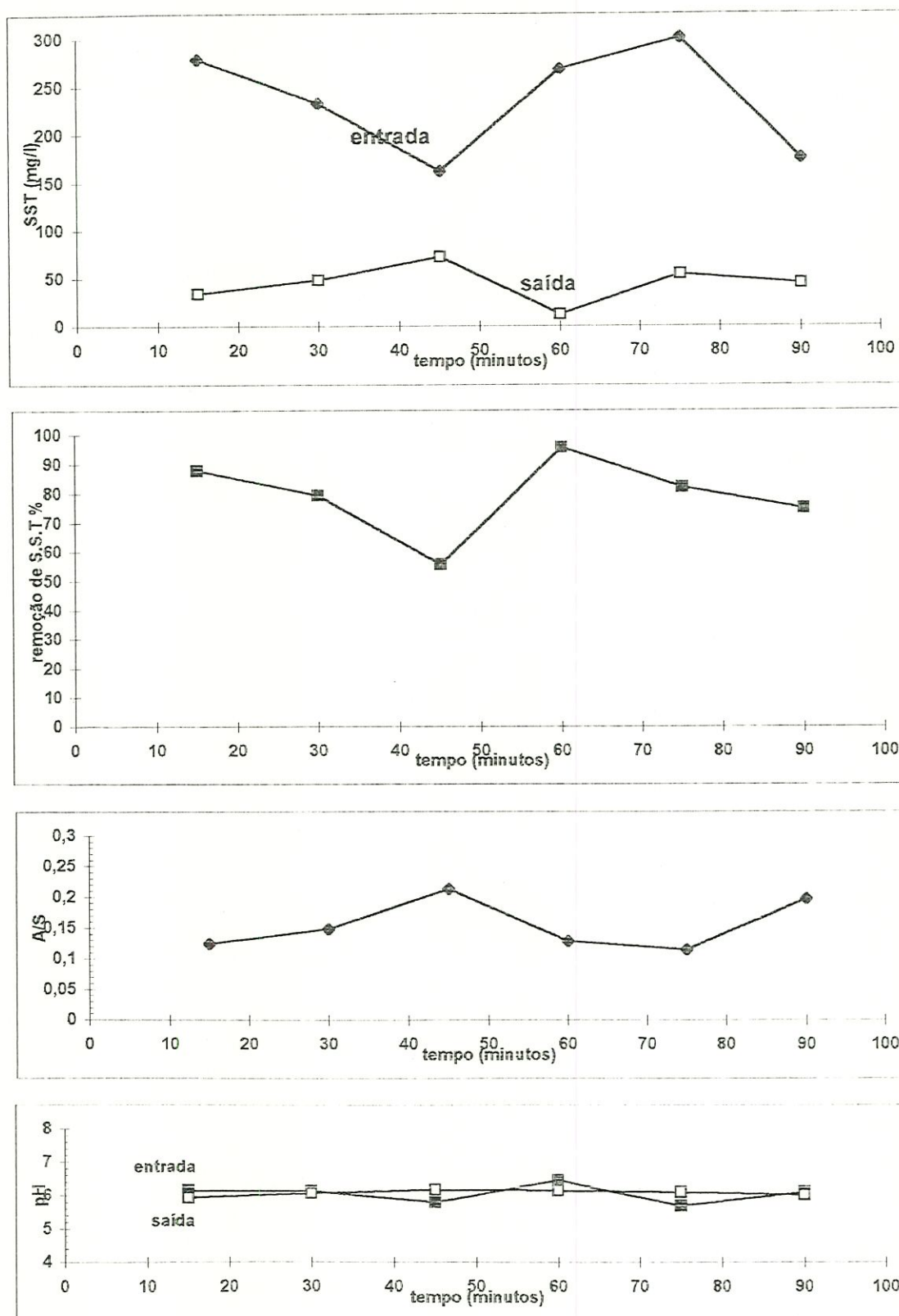


Figura 21 : Resultados obtidos no Ensaio 2 durante o tempo de operação da instalação piloto de flotação com escoamento contínuo, em termos de Sólidos Suspensos Totais (SST), A/S, remoção de SST e pH da mistura. Características do Ensaio: TAS = 120 n/d, 63% de recirculação e A/S médio = 0,1679.

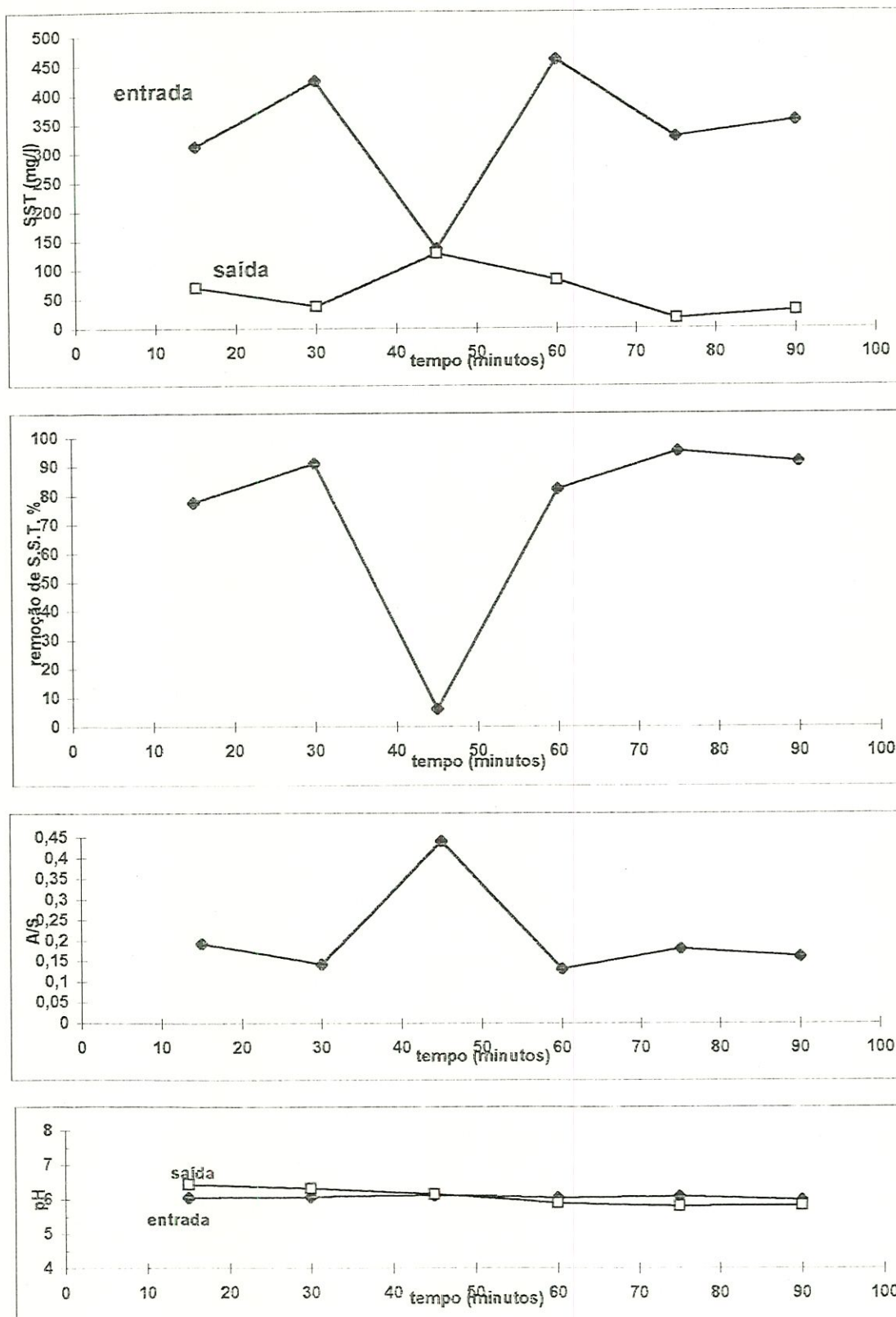


Figura 22 : Resultados obtidos no Ensaio 3 durante o tempo de operação da instalação piloto de flotação com escoamento contínuo, em termos de Sólidos Suspensos Totais (SST), A/S, remoção de SST e pH da mistura. Características do Ensaio: TAS = 120 m/d, 96% de recirculação e A/S médio = 0,1892.

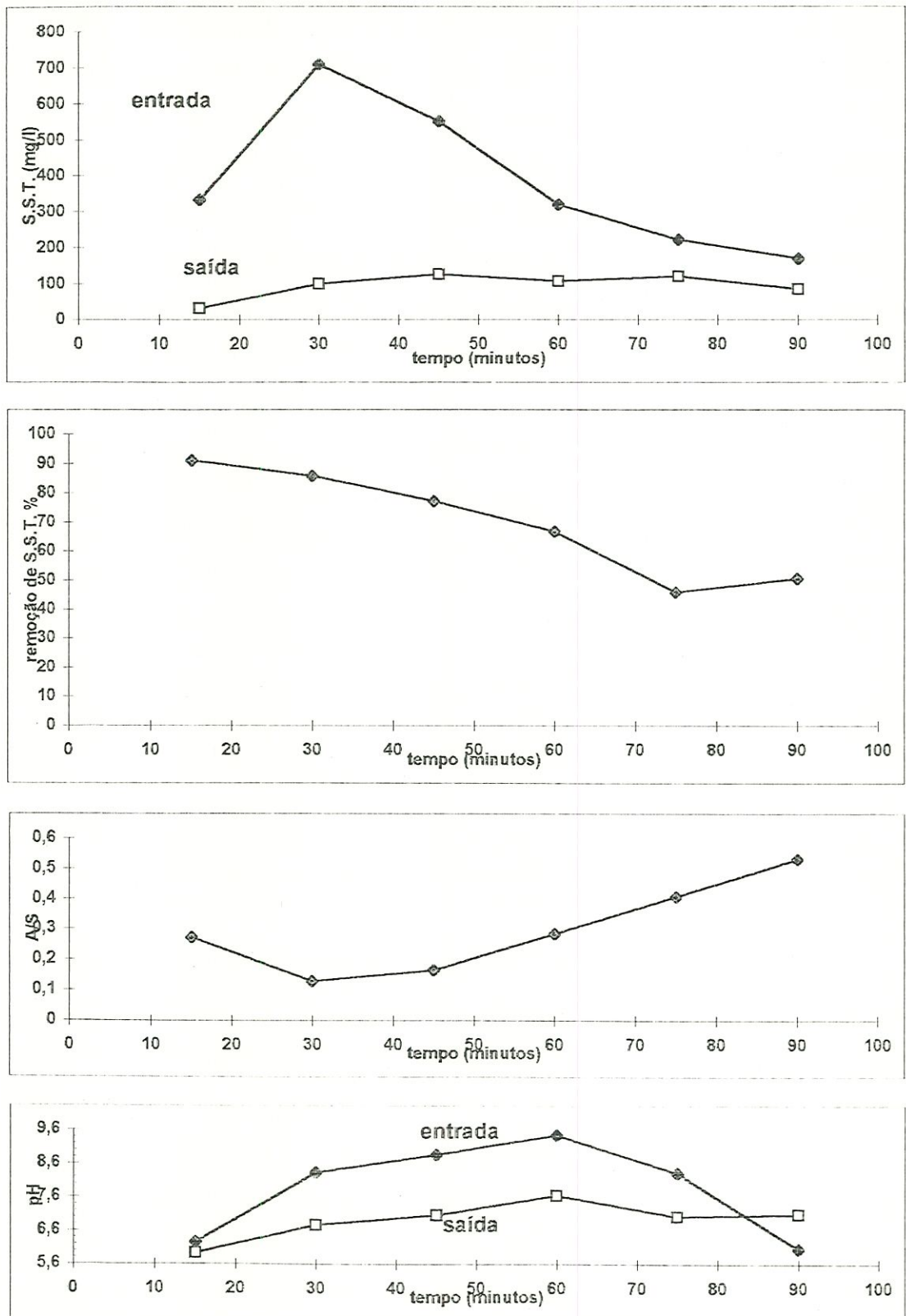


Figura 23 : Resultados obtidos no Ensaio 4 durante o tempo de operação da instalação piloto de flotação com escoamento contínuo, em termos de Sólidos Suspensos Totais (SST), A/S, remoção de SST e pH da mistura. Características do Ensaio: TAS = 120 m/d, 145% de recirculação e A/S médio = 0,2358.

Os ensaios na TAS de 160 e 200  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$  apresentaram resultados em média muito parecidos. Nas Figuras 24 e 25 são apresentados os resultados com a TAS de 160  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$  (ensaios 5 a 8) e com a TAS de 200  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$  (ensaios 9 a 12). As remoções para a TAS de 160  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$  variaram de 37,2% (160  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$  e 139% de recirculação) à 88,6% (160  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$  e 87% de recirculação).

A razão A/S variou, para a TAS de 160  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$ , de 0,0551 (ensaio 5) à 0,2946 (ensaio 7). Para a taxa de 200  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$ , a razão A/S variou de 0,0489 (ensaio 9) à 0,1570 (ensaio 12).

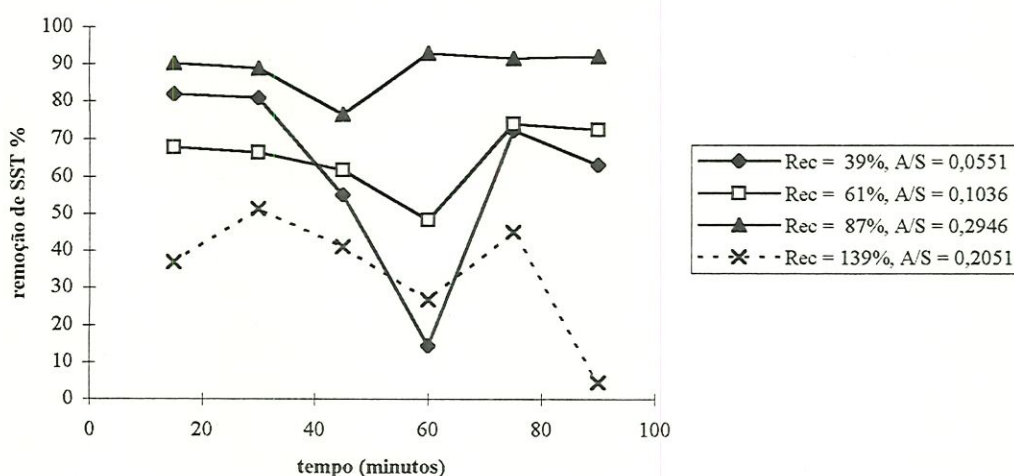


Figura 24 - Resultados obtidos com a instalação piloto de FAD em termos de eficiência na remoção de SST (%) em função do tempo para a TAS de 160  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$ , sem aplicação de cloreto férrico (Ensaios 5 a 8).

A figura 26 apresenta os resultados do ensaio 5 (TAS = 160  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$  e 39% de recirculação). A remoção média de SST foi de 67,4%. O pH foi mantido entre 5,9 e 7,0. A remoção de DQO foi de 12% para uma DQO afluente de 5000  $\text{mg}/\text{l}$ . A razão A/S variou entre 0,0376 e 0,1178, tendo o valor médio de 0,0551.

A figura 27 mostra os resultados do ensaio 6 (TAS = 160  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$  e 61% de recirculação), que representou o pior desempenho para essa TAS (remoção de SST de 66,3%) apesar do aumento da razão A/S média para 0,1036. O pH foi mantido entre 5,9 e 6,6. A remoção de DQO foi de 9,09% para uma DQO afluente de 4400  $\text{mg}/\text{l}$ .

A figura 28 mostra os resultados do ensaio 7 (TAS = 160  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$  e 87% de recirculação), que foi o de melhor desempenho em termos de remoção de

SST (88,6%) entre todas as TAS aplicadas, sem o uso do cloreto férrico como coagulante. O pH foi mantido entre 6,3 e 6,9. A razão A/S foi a melhor para essa TAS, tendo 0,2946 como valor médio. A remoção de DQO, contudo, manteve-se a mesma que a do ensaio anterior, registrando 9,09% para uma DQO afluente de 4400 mg/l. Foi verificado neste ensaio (ensaio 7 -  $160 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$  e 87% de recirculação), além de uma menor entrada de SST (183 mg/l), também houve uma ótima floculação e, como foi citado acima, a maior razão A/S desta taxa.

A figura 29 mostra os resultados do ensaio 8 (TAS =  $160 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$  e 139% de recirculação), que teve o pior desempenho em termos de remoção de SST (37,2%). Este resultado “negativo” ocorreu devido a turbulência causada pelo registro de agulha. A razão A/S média foi de 0,2051. A remoção de DQO, contudo, foi a melhor desta TAS (17,2% para 5800 mg/l de DQO afluente).

Nos ensaios realizados na TAS de  $200 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ , para as recirculações de 84% e 126% (remoção de SST de 58,7% e 56,8%, respectivamente), ficou claro a importância do dispositivo de despressurização da recirculação na baixa eficiência de remoção de SST (ver Figuras 25 e 34), pois houve turbulência na câmara de flotação, devido à formação de bolhas grandes (nocivas a Flotação por Ar Dissolvido). A eficiência foi consideravelmente maior para uma recirculação de 34% e 55% (72,9% e 77,5%, respectivamente), quando não foi verificado esse tipo de problema.

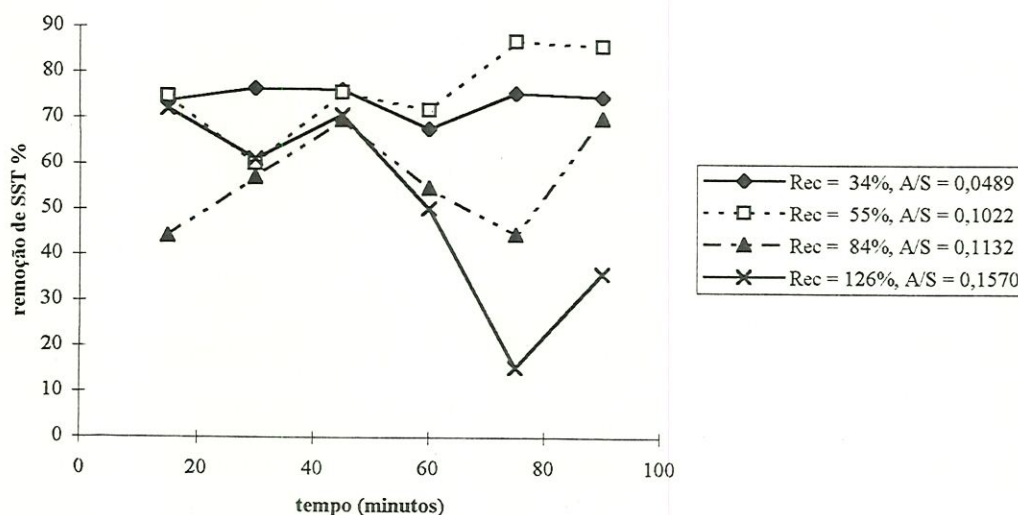


Figura 25 - Resultados obtidos com a instalação piloto de FAD em termos de eficiência na remoção de SST (%) em função do tempo para a TAS de  $200 \text{ m}^3/\text{d}$ , sem aplicação de cloreto férrico (Ensaio 9 a 12).

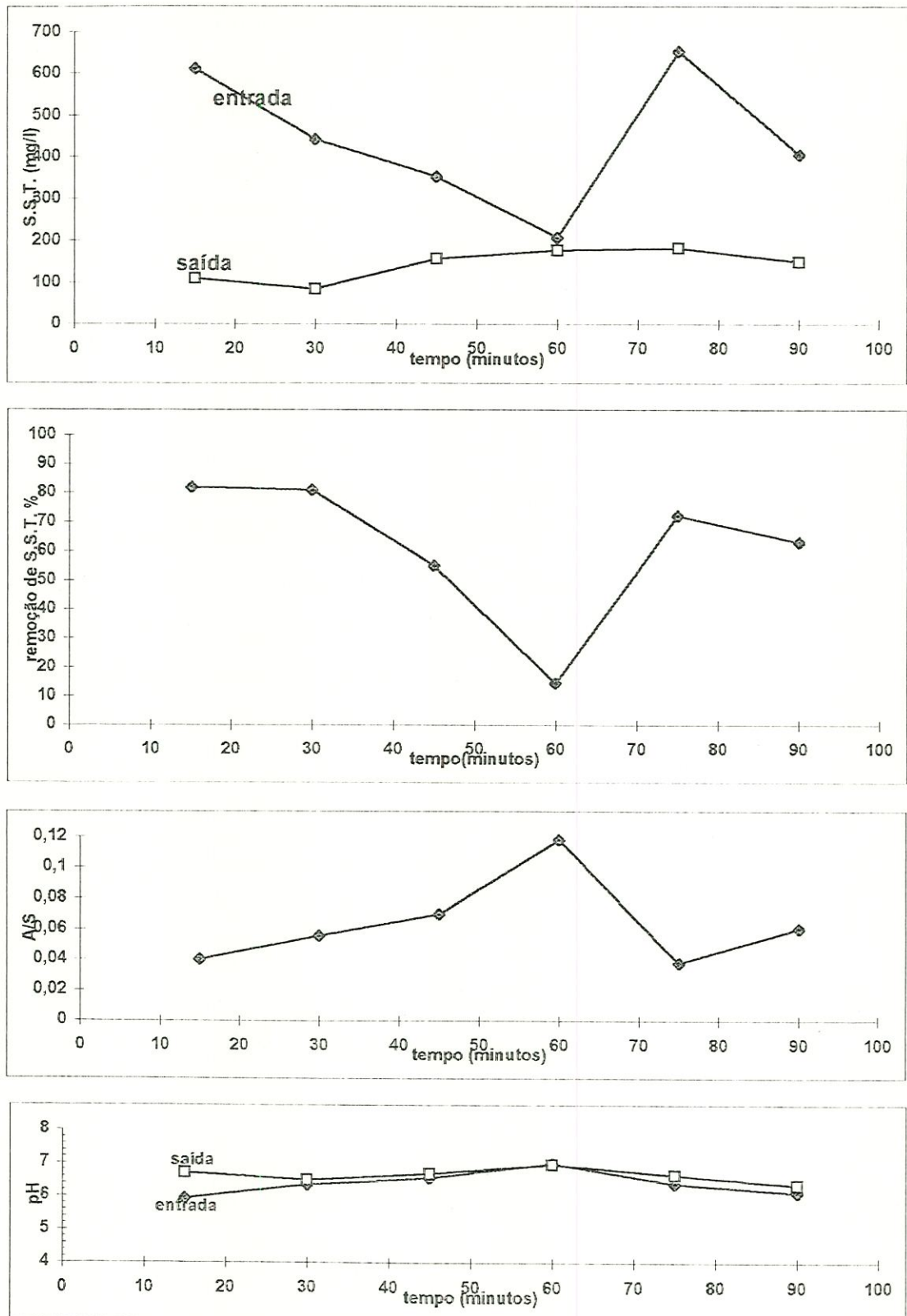


Figura 26 : Resultados obtidos no Ensaio 5 durante o tempo de operação da instalação piloto de flotação com escoamento contínuo, em termos de Sólidos Suspensos Totais (SST), A/S, remoção de SST e pH da mistura. Características do Ensaio: TAS = 160 m/d, 39% de recirculação e A/S médio = 0,0551.

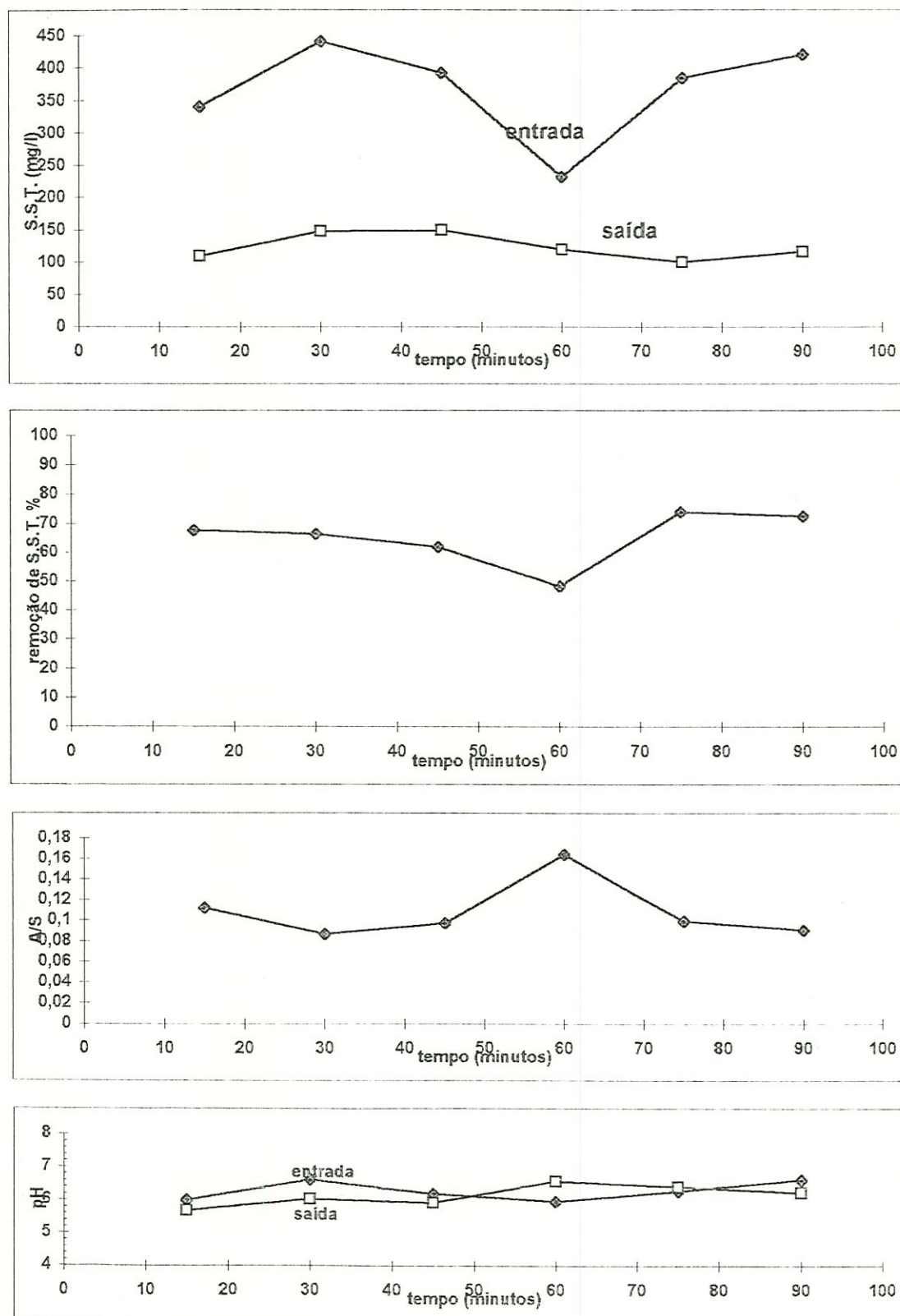


Figura 27 : Resultados obtidos no Ensaio 6 durante o tempo de operação da instalação piloto de flotação com escoamento contínuo, em termos de Sólidos Suspensos Totais (SST), A/S, remoção de SST e pH da mistura. Características do Ensaio: TAS = 160 m/d, 61% de recirculação e A/S médio = 0,1036.

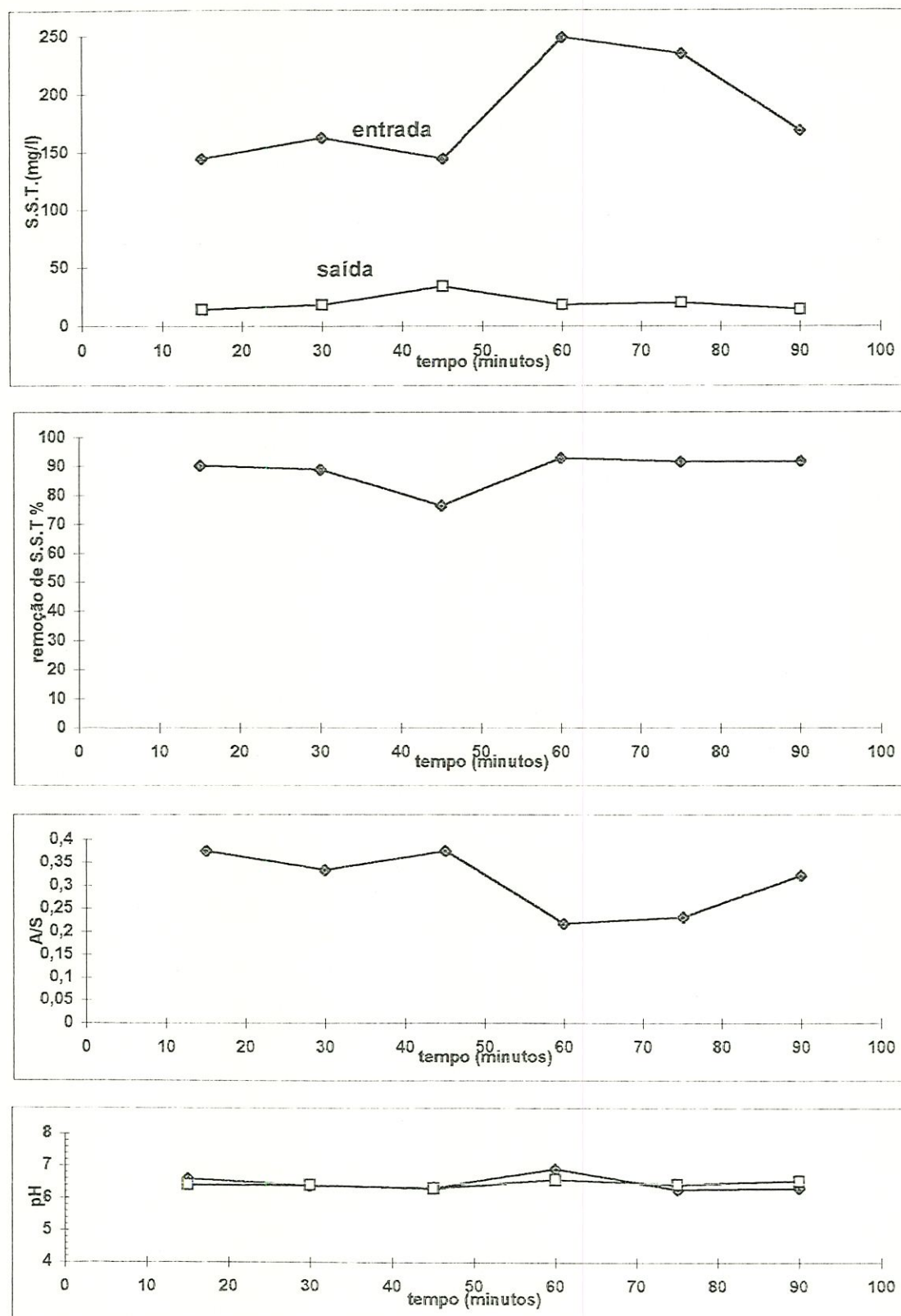


Figura 28 : Resultados obtidos no Ensaio 7 durante o tempo de operação da instalação piloto de flotação com escoamento contínuo, em termos de Sólidos Suspensos Totais (SST), A/S, remoção de SST e pH da mistura. Características do Ensaio: TAS = 160 m/d, 87% de recirculação e A/S médio = 0,2946.



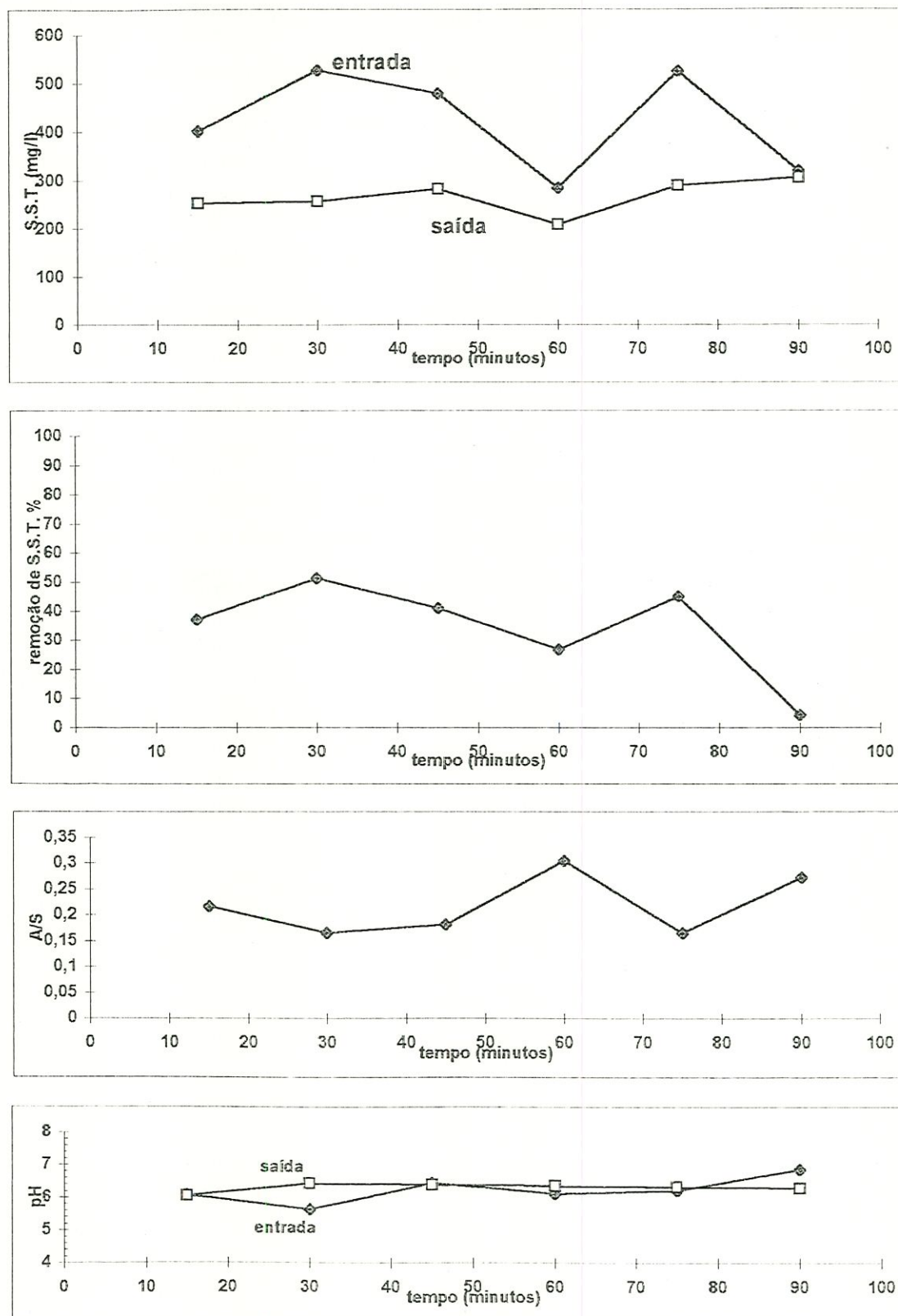


Figura 29 : Resultados obtidos no Ensaio 8 durante o tempo de operação da instalação piloto de flotação com escoamento contínuo, em termos de Sólidos Suspensos Totais (SST), A/S, remoção de SST e pH da mistura. Características do Ensaio: TAS = 160 m/d, 139% de recirculação e A/S médio = 0,2051.

A figura 30 que representa os resultados do ensaio 9 (TAS = 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d e 34% de recirculação), mostra uma remoção média de SST de 72,9%. O pH foi mantido entre 6,3 e 6,8. A razão A/S média foi de 0,0489 e a remoção de DQO foi de 5,00% para uma DQO afluyente de 4000 mg/l.

A figura 31 mostra os resultados do ensaio 10 (TAS = m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d e 55% de recirculação). Este ensaio foi o melhor para esta TAS (77,5% de remoção de SST). O pH foi mantido entre 6,1 e 6,6. A razão A/S variou entre 0,0667 e 0,1323, tendo 0,1022 como valor médio.

A figura 32 e 33 apresentam os resultados do ensaio 11 (TAS = 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d e 84% de recirculação) e do ensaio 12 (TAS = 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d e 126 % de recirculação), respectivamente. As remoções de SST para estes ensaios foram de 58,7% (ensaio 11) e 56,8% (ensaio 12). O resultado do ensaio 12 foi o pior nesta TAS para SST, porém foi o melhor na remoção de DQO afluyente (20,0% de remoção em 5000 mg/l).

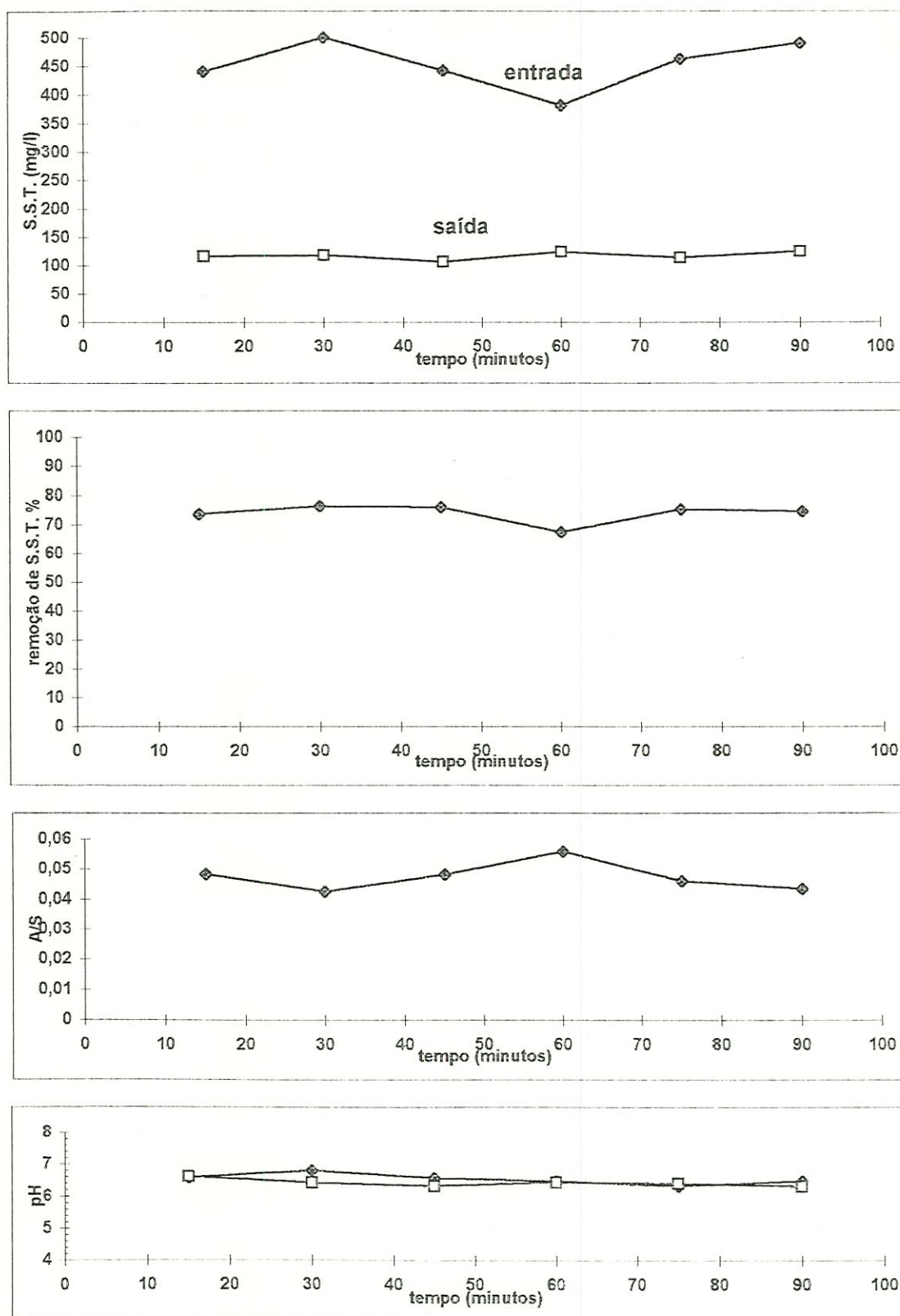


Figura 30 : Resultados obtidos no Ensaio 9 durante o tempo de operação da instalação piloto de flotação com escoamento contínuo, em termos de Sólidos Suspensos Totais (SST), A/S, remoção de SST e pH da mistura. Características do Ensaio: TAS = 200 m/d, 34% de recirculação e A/S médio = 0,0489.

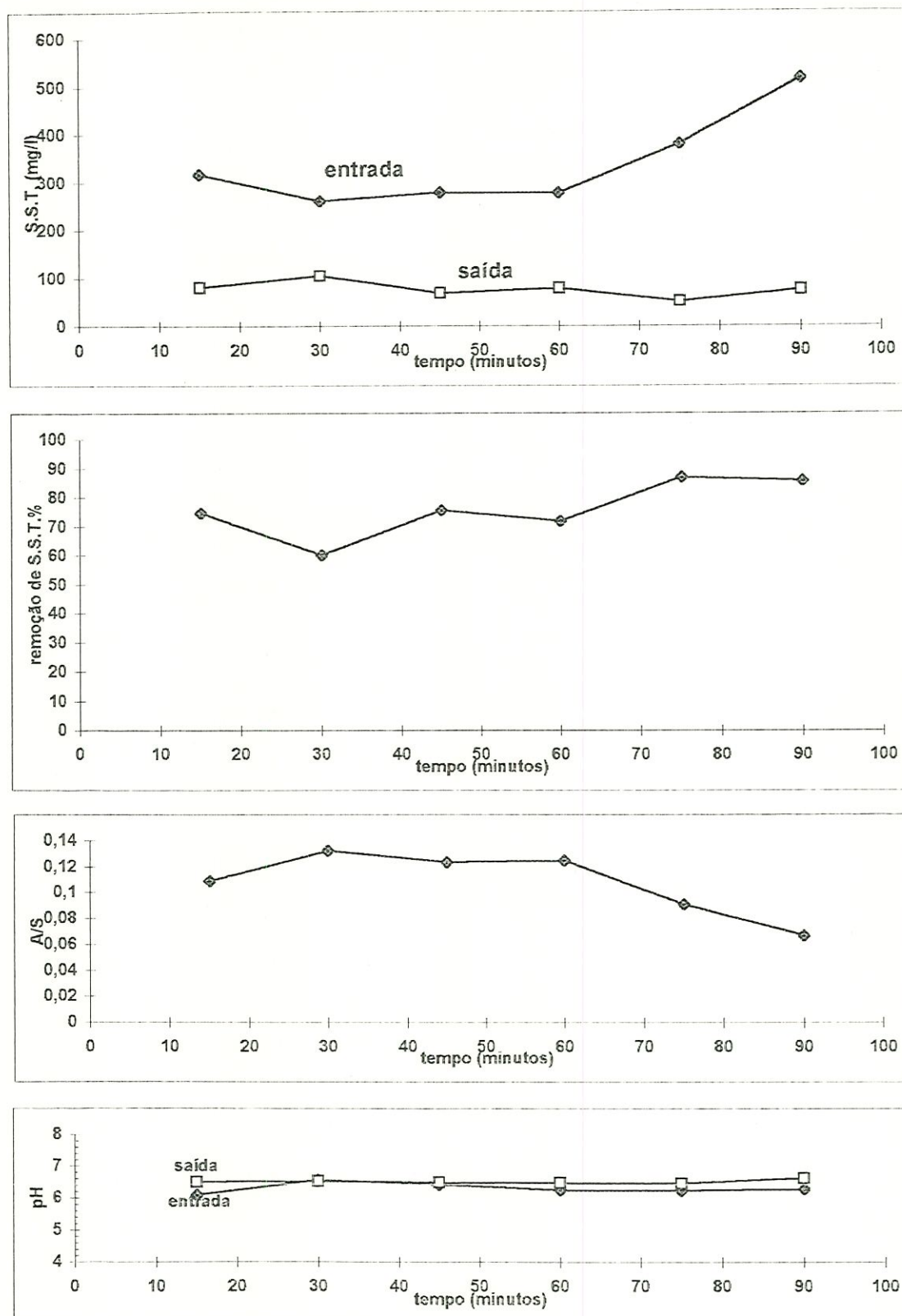


Figura 31 : Resultados obtidos no Ensaio 10 durante o tempo de operação da instalação piloto de flotação com escoamento contínuo, em termos de Sólidos Suspensos Totais (SST), A/S, remoção de SST e pH da mistura. Características do Ensaio: TAS = 200 m/d, 55% de recirculação e A/S médio = 0,1022.

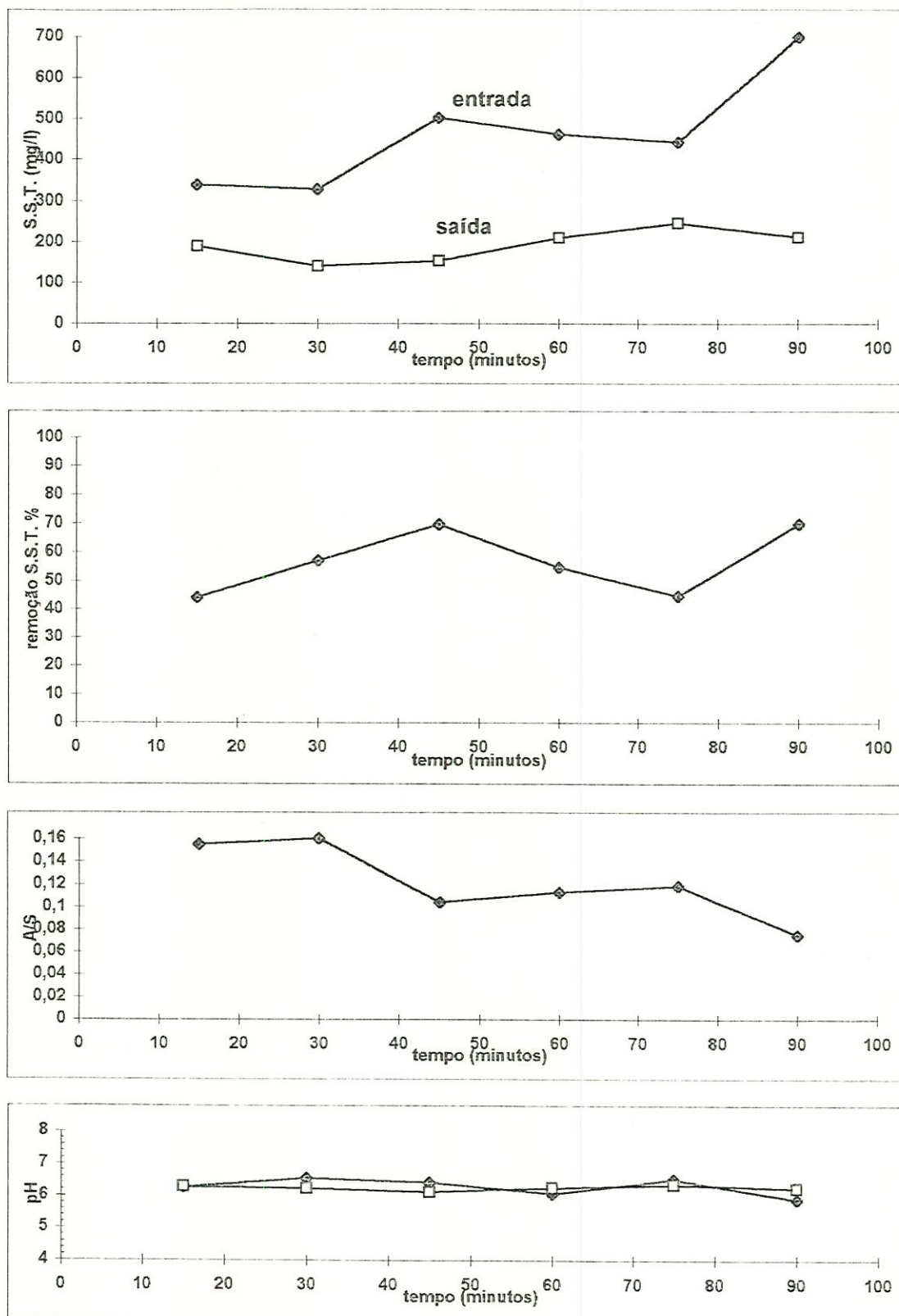


Figura 32 : Resultados obtidos no Ensaio 11 durante o tempo de operação da instalação piloto de flotação com escoamento contínuo, em termos de Sólidos Suspensos Totais (SST), A/S, remoção de SST e pH da mistura. Características do Ensaio: TAS = 200 m/d, 84% de recirculação e A/S médio = 0,1132.

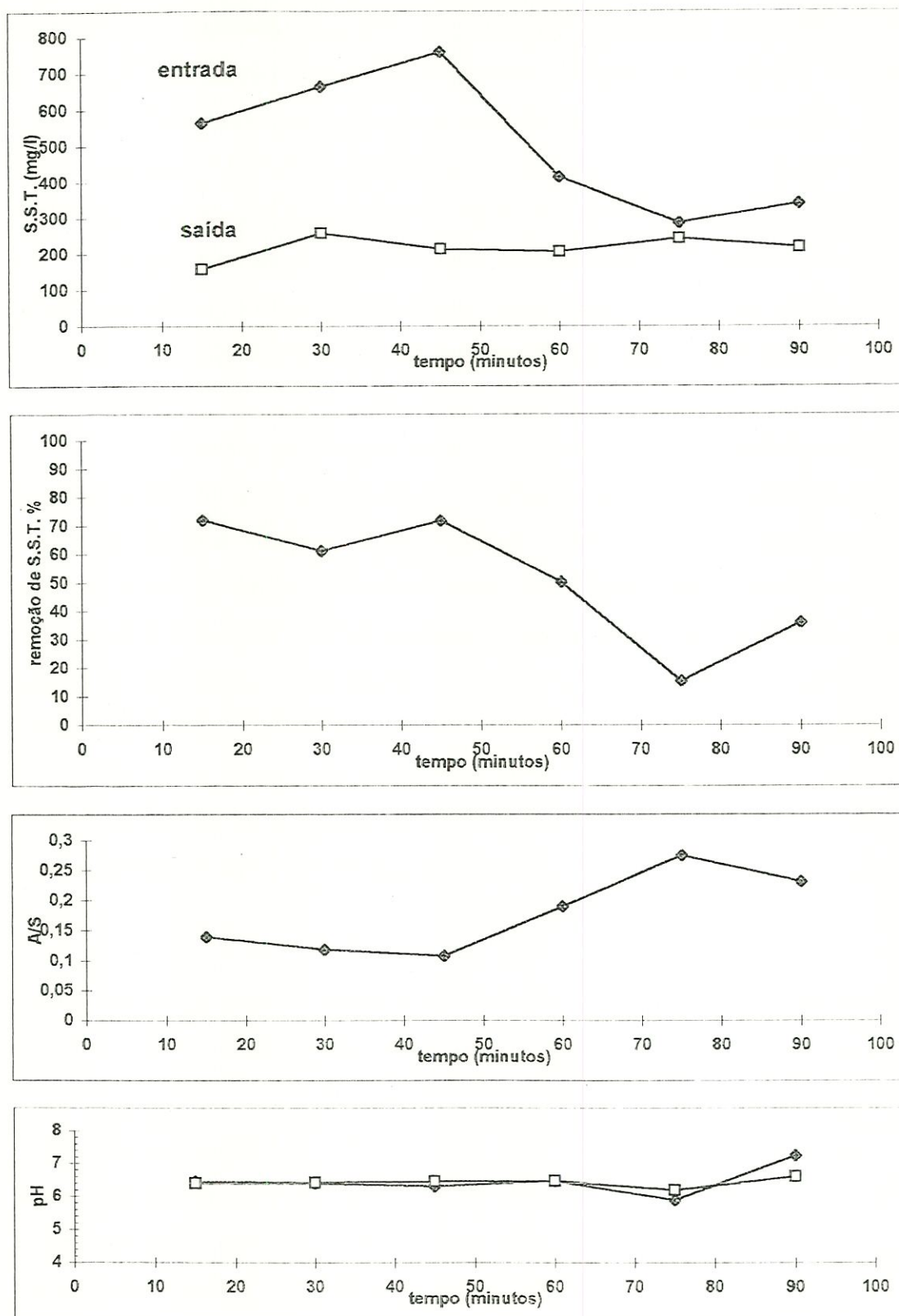


Figura 33 : Resultados obtidos no Ensaio 12 durante o tempo de operação da instalação piloto de flotação com escoamento contínuo, em termos de Sólidos Suspensos Totais (SST), A/S, remoção de SST e pH da mistura. Características do Ensaio: TAS = 200 m/d, 126% de recirculação e A/S médio = 0,1570.

### 5.5.3 - Ensaio realizados na instalação piloto com aplicação de cloreto férrico

Os ensaios com aplicação de cloreto férrico (ensaios 13, 14, 15 e 16) apresentaram excelentes resultados, como pode ser visto também nas Figuras 39, 40 e 42. A remoção de SST variou de 84,81% (160 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d, 39% de recirculação, A/S = 0,0335, CF = 50 mg/l) a 97,60% (200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d, 26% de recirculação, A/S = 0,0428, CF = 50 mg/l), com uma remoção média, independente da dosagem, de 93,1%. Observa-se assim, que a dosagem de cloreto férrico melhorou e influenciou positivamente nos resultados, tendo sido possível até a redução de recirculação (200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d a 15% de recirculação).

A tabela 14 a seguir mostra as determinações de Sulfatos (ensaios 13,14, 15 e 16) e Sulfetos (ensaios 13 e 14) realizadas para verificar a presença destes compostos na água estudada. A remoção de sulfetos, usando a FAD aliada à aplicação de cloreto férrico, é possível através da combinação do sulfeto com o ferro do coagulante, resultando em um precipitado (sulfeto de ferro) que é removido da água. Foi verificado, a partir desses resultados, que é possível uma significativa remoção de sulfetos, onde o ensaio 14 (TAS = 160 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d, 39% de recirculação e 50 mg/l de cloreto férrico), foi verificado a melhor remoção (31,8%). Em todas as amostras analisadas foram encontrados sulfatos. A concentração de sulfatos variou entre 40,4 mg/l (Ensaio 14) e 430 mg/l (Ensaio 15).

TABELA 14 - Remoção de Sulfatos e Sulfetos nos ensaios realizados com cloreto férrico

Parâmetro	Ensaio N <sup>o</sup>			
	13	14	15	16
Sulfatos afluente (mg/l)	97,8	40,4	430	323
Sulfetos afluente (mg/l)	3,84	2,64	-	-
Sulfetos efluente (mg/l)	2,64	1,80	-	-
Remoção Sulfetos (%)	31,3	31,8	-	-

Obs.: Não foram realizadas as determinações de Sulfetos nos ensaios 15 e 16 por falta de reagentes no Laboratório da Citrosuco.



FIGURA 34 - Foto do Ensaio 12 (TAS =  $200 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ , Rec. = 126% e eficiência de 56,8% de remoção), realizado em 08/12/94, mostrando o colapso do ensaio devido a turbulência.

A figura 35 mostra a representação dos resultados do ensaio 13 (TAS =  $160 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ , 39% de recirculação e 100 mg/l de cloreto férrico), onde foi observado excelente formação de flocos e remoção de SST (94,5%). O pH foi mantido entre 6,4 e 6,8. A remoção de DQO filtrada foi de 6,67% para uma DQO filtrada afluenta de 3000 mg/l. A razão A/S média foi 0,0335.

A figura 36 mostra a representação dos resultados do ensaio 14 (TAS =  $160 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ , 39% de recirculação e 50 mg/l de cloreto férrico). Este ensaio apresentou a menor remoção de SST com adição de cloreto férrico (84,8%) e a melhor remoção de DQO filtrada verificada entre todos os ensaios realizados (35,3%, para uma DQO filtrada afluenta de 3400 mg/l). O pH foi mantido em 6,3 e a razão A/S média foi de 0,0642.

O ensaio 15 (TAS =  $200 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ , 26% de recirculação e 50 mg/l de dosagem de cloreto férrico) foi realizado sem controle de pH. O pH variou entre 4,3 e 4,5. Na figura 37 podemos ver que a remoção de SST foi excelente (97,6%), a



melhor entre todos os ensaios realizados. A remoção de DQO filtrada foi de 5,99% para uma DQO filtrada afluente de 2636 mg/l e a razão A/S média foi de 0,0428.

O ensaio 16 (TAS = 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d, 15% de recirculação e 50 mg/l de dosagem de cloreto férrico), assim como o ensaio 15, foi realizado sem controle de pH. Como pode ser visto na figura 38, o pH variou entre 4,0 e 7,6. A remoção média de SST foi excelente (95,3%), assim como a remoção de DQO filtrada (26,3%). A razão A/S média foi de 0,0224.

As Figuras 39 e 40 mostram os benefícios causados pela adição de cloreto férrico na floculação e remoção de SST por FAD na água estudada. Na Figura 23, visualiza-se a formação de flocos e o aspecto da saída da câmara de flotação no Ensaio 15 (TAS = 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d, Rec. = 26%, eficiência de 97,6% de remoção).

Analisando-se os resultados dos ensaios em que foi aplicado coagulante (Ensaio 13 a 16), verifica-se que, para os valores de TAS investigadas (160 e 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d), a unidade de flotação apresentou excelente desempenho para valores de A/S na faixa de 20/1000 a 65/1000. Tais valores estão dentro da faixa usualmente empregada no tratamento de águas residuárias e espessamento de lodo por flotação (5/1000 a 60/1000). Por outro lado, observando-se os resultados dos ensaios sem aplicação de coagulante, verifica-se que, de maneira geral não houve uma relação clara entre eficiência de remoção de SST com a relação A/S. Nos ensaios realizados, houve uma variação considerável, em alguns casos, na entrada da piloto de SST, alterando a razão A/S provável se não houvesse variação desse parâmetro. Por outro lado, um aumento exagerado no valor de A/S (aumentando a recirculação) representou, em certos casos, num aumento de turbulência na unidade de flotação (devido à formação de bolhas grandes), diminuindo a eficiência pela desestabilização da “escuma” previamente formada. Este fenômeno aconteceu durante alguns ensaios devido, principalmente, a um baixo rendimento do dispositivo de despressurização da vazão de recirculação (registro de agulha) durante estas ocasiões.

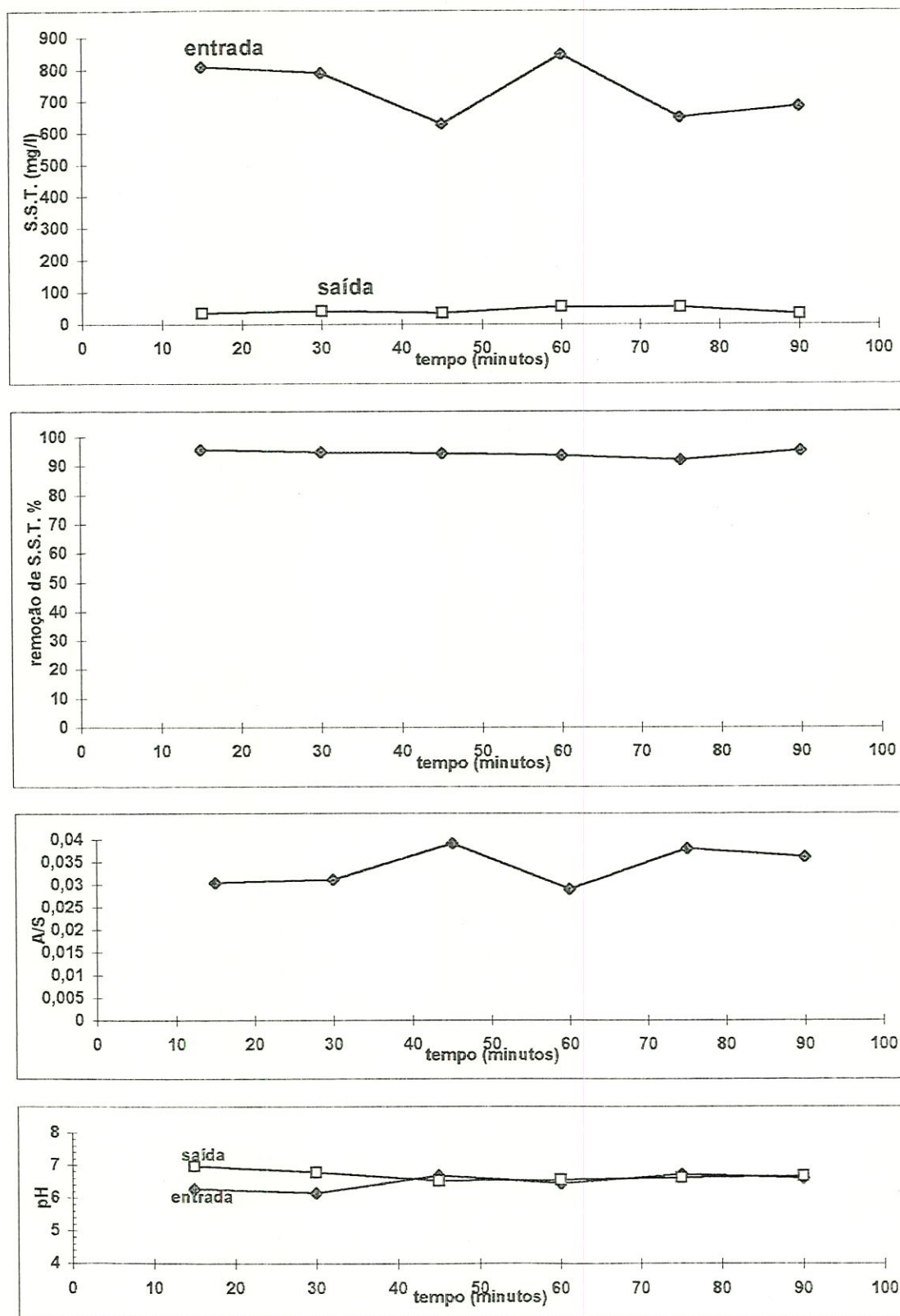


Figura 35 : Resultados obtidos no Ensaio 13 durante o tempo de operação da instalação piloto de flotação com escoamento contínuo, em termos de Sólidos Suspensos Totais (SST), A/S, remoção de SST e pH da mistura. Características do Ensaio:  
 TAS = 160 m/d, 39% de recirculação, Cloreto Férrico = 100 mg/l e A/S médio = 0,0335.

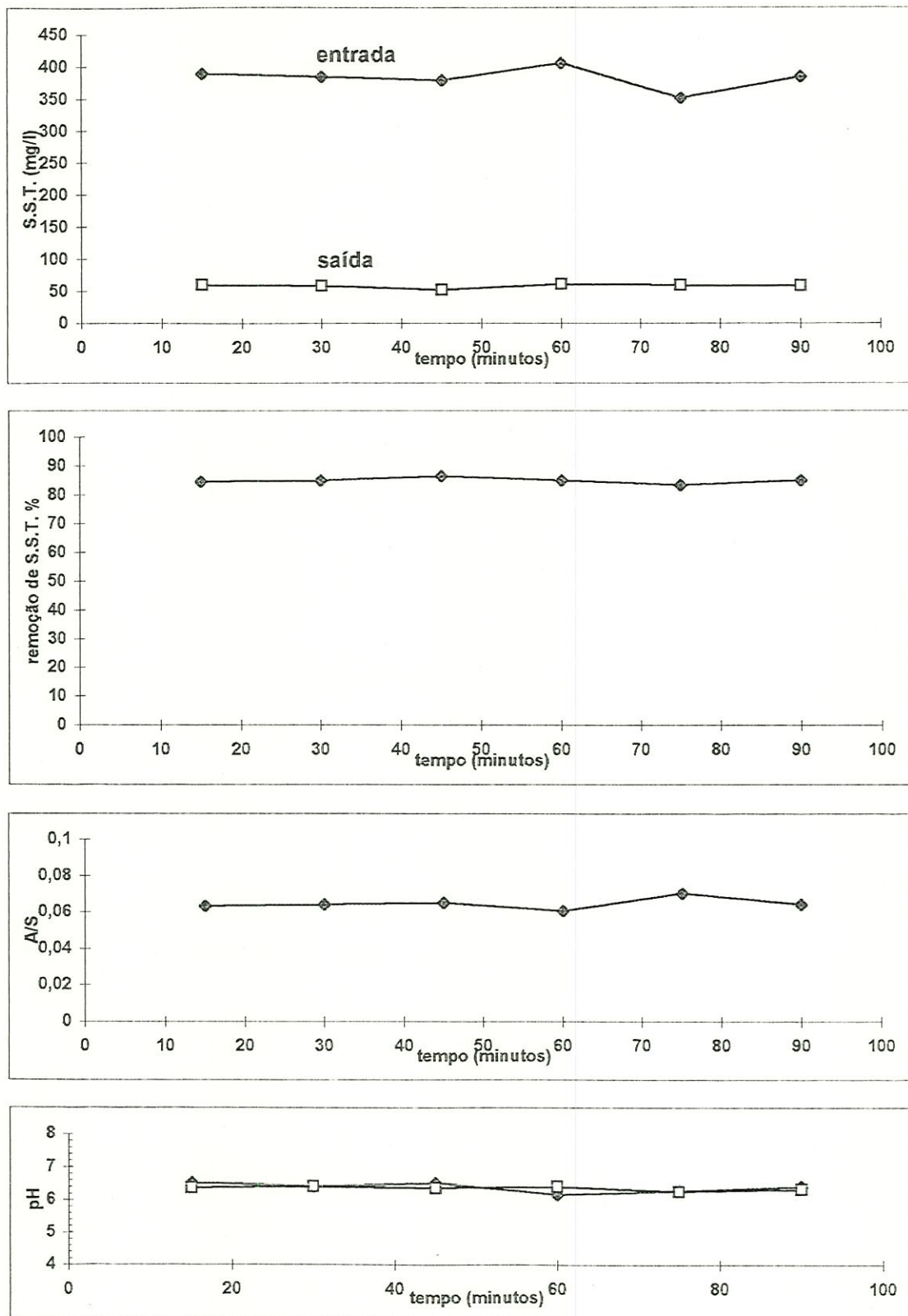


Figura 36 : Resultados obtidos no Ensaio 14 durante o tempo de operação da instalação piloto de flotação com escoamento contínuo, em termos de Sólidos Suspensos Totais (SST), A/S, remoção de SST e pH da mistura. Características do Ensaio:  
 TAS = 160 m/d, 39% de recirculação, Cloreto Férrico = 50 mg/l e A/S médio = 0,0642.

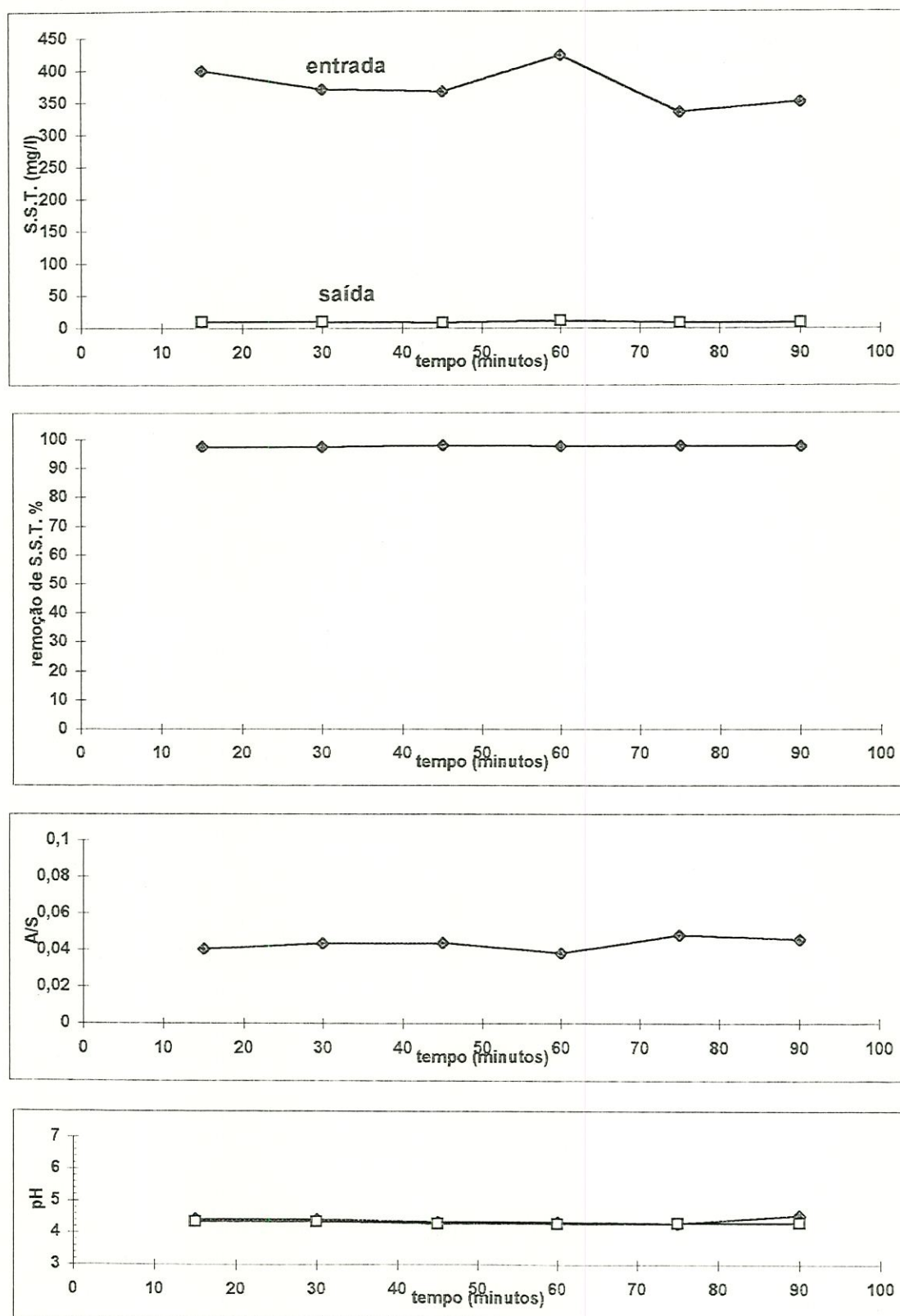


Figura 37 : Resultados obtidos no Ensaio 15 durante o tempo de operação da instalação piloto de flotação com escoamento contínuo, em termos de Sólidos Suspensos Totais (SST), A/S, remoção de SST e pH da mistura. Características do Ensaio: TAS = 200 m/d, 26% de recirculação, Cloreto Férrico = 50 mg/l e A/S médio = 0,0428.

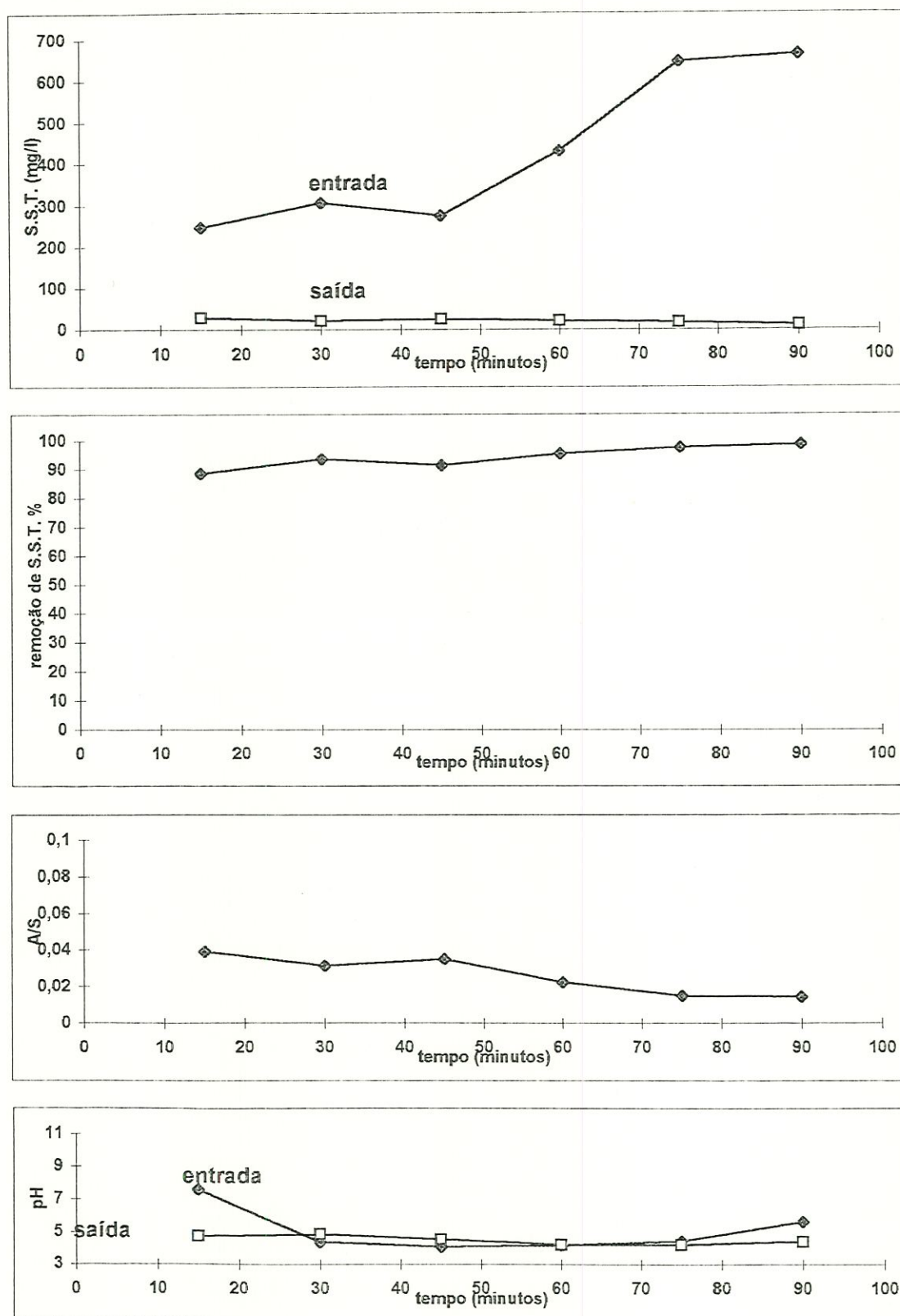


Figura 38 : Resultados obtidos no Ensaio 16 durante o tempo de operação da instalação piloto de flotação com escoamento contínuo, em termos de Sólidos Suspensos Totais (SST), A/S, remoção de SST e pH da mistura. Características do Ensaio:  
 TAS = 200 m/d, 15% de recirculação, Cloreto Férrico = 50 mg/l e A/S médio = 0,0224.

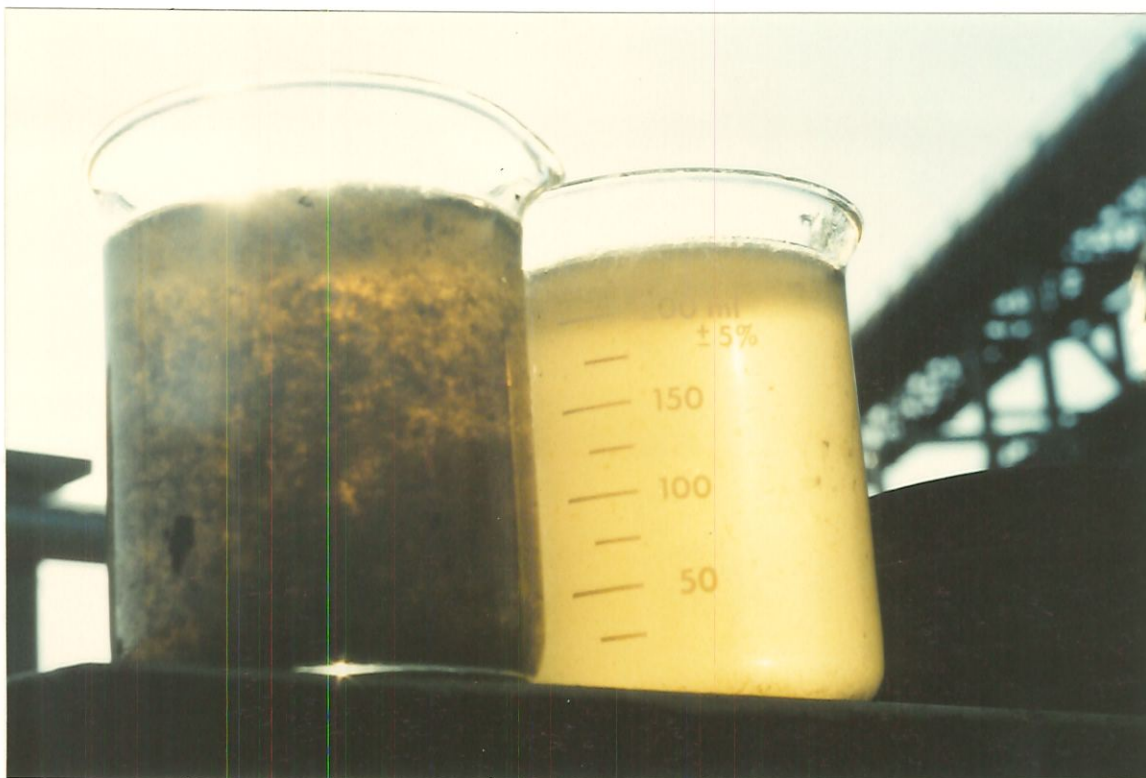


Figura 39 - Foto de amostras retiradas na entrada e saída da unidade piloto de FAD no Ensaio 15, realizado em 17/08/95, mostrando a eficiência do uso de cloreto férrico e os aspectos visuais das amostras.



Figura 40 - Foto mostrando aspecto da água pré-tratada na unidade piloto de FAD no Ensaio 15, realizado em 17/08/95, mostrando a eficiência do uso de cloreto férrico.

## 5.6- Determinações realizadas com amostras de lodo coletado na unidade de flotação

### 5.6.1- Determinação do teor de sólidos no lodo flotado

Em todos os ensaios realizados foi determinado o teor de sólidos presentes no lodo flotado. O lodo era removido ao final de cada ensaio realizado (90 minutos após o início). O lodo se apresentou espesso e firme em muitos dos ensaios, como pode ser visto na Figura 41. O Teor de sólidos, como pode ser visto na Tabela 13, variou entre 6,2% (Ensaio 16) e 14,2% (Ensaio 2), tendo como valor médio 10,9%.

### 5.6.2- Composição da fração orgânica do lodo seco

Os resultados das determinações de concentração de proteínas, carboidratos e lipídeos presentes no lodo flotado são apresentados na Tabela 15, a seguir. Para a realização de tais determinações, foram extraídas amostras ao longo dos Ensaios 15 e 16.

TABELA 15 - Quantidade de proteínas, carboidratos e lipídeos provenientes da unidade piloto de FAD por grama de lodo seco

Ensaio N <sup>o</sup>	Proteínas (mg/g)	Carboidratos (mg/g)	Lipídeos (mg/g)
15	75,5	16,6	0,0
16	116,3	18,6	75,0

Como pode ser visto, a quantidade de proteínas presentes nos lodos variaram, nestes ensaios, entre 75,5 mg/g (Ensaio 15) e 116,3 mg por grama de lodo seco (Ensaio 16). A quantidade de proteína presente no lodo é significativa, principalmente por não se tratar de lodo rico em microrganismos (como o de lodos ativados, por exemplo) ou proveniente de indústrias ricas em seus efluentes deste constituinte. Sob o ponto de vista de percentagem, entre 7,55% e 11,63% em massa do lodo estudado constituía proteínas, resultado bastante promissor do ponto de vista de aproveitamento desses sólidos para fabricação de ração animal. Vale lembrar, por

exemplo, que o lodo ativado proveniente de estações de tratamento da indústria de laticínios no trabalho realizado por CLEVINGER (1990), continha entre 28,7 e 40,9% de proteína bruta, enfatizando que o leite é um alimento rico em proteína e que o lodo ativado é formado por microrganismos.

A quantidade de carboidratos variou pouco de uma amostra para a outra (16,6 - 18,6 mg/g). Em termos de percentagem no lodo das amostras representou 1,66 e 1,86% de carboidratos. Este resultado é menor do que aquele lodo proveniente de lodos ativados apresentado pela Tabela 9 (GRANT, 1985), na qual o valor típico na composição de lodos ativados processados e secos de carboidratos era de 4,0%.

Os lipídeos não foram detectados na primeira amostra, contudo, na segunda amostra, sua presença no lodo foi de 75mg/g ou 7,5%.

Infelizmente não foi possível a realização de outras determinações nutricionais principalmente devido ao pouco tempo disponível na época para realizar os ensaios. Todavia os resultados mostram que o lodo flotado é uma fonte potencial de proteínas, carboidratos e lipídeos. A quantidade de cinzas, apesar de não mensurada, parece ser considerável, tendo-se em vista o fato da água preta incorporar grande quantidade de resíduos carbonizados gerados nos secadores de bagaço (queima de material combustível para geração de calor nos secadores). O uso do cloreto férrico, além dos benefícios citados acima, enriquece o lodo com ferro.

O uso de cal para corrigir o pH das águas residuárias poderá representar também benefícios para a qualidade, em termos de aproveitamento, do lodo flotado.





FIGURA 41 - Foto tirada durante o Ensaio 9, no dia 06/12/94, mostrando o aspecto do lodo flotado firme e espesso, como na maioria dos ensaios.

### 5.7. Comparação entre os ensaios com e sem aplicação de cloreto férrico

Os ensaios com aplicação de cloreto férrico apresentaram excelentes remoções de SST e formação de flocos. É bem verdade que, em alguns ensaios, sem o uso de cloreto férrico, também houve a floculação e remoção de sólidos suspensos por flotação com boa eficiência. Entretanto, nos ensaios em que foi aplicado o referido coagulante, a eficiência e a estabilidade do processo de flotação foram

maiores, como pode ser visto na Figura 42. Durante a realização dos ensaios com a instalação piloto verificou-se mudanças repentinas nas características do afluente, fato esse que prejudicou sobremaneira a análise dos resultados.

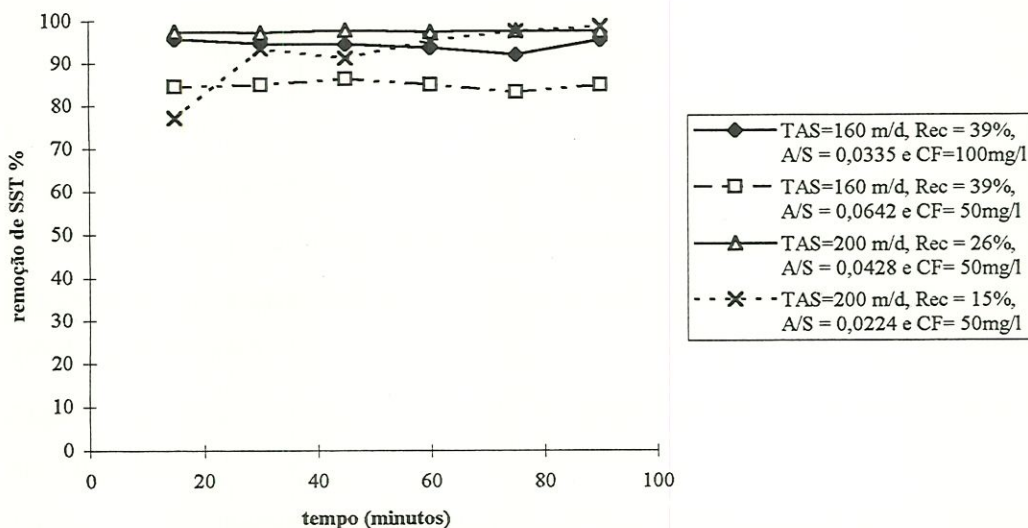


FIGURA 42 - Resultados obtidos com a instalação piloto de FAD em termos de eficiência na remoção de SST (%) em função do tempo para as TAS de 160 m/d e 200 m/d, com aplicação de cloreto férrico (Ensaio 13 a 16).

As mudanças na qualidade da água podem ser minimizadas com a construção de um tanque de equalização. Outro equipamento que fez falta, a nível de controle geral do tratamento, foi um medidor de vazão para a água preta.

Um fator importante para um bom resultado é aliar o fornecimento de micro-bolhas (através da recirculação), à ausência de turbulência dentro da câmara de flotação. Uma recirculação muito alta, quando o dispositivo não suporta (como o usado na unidade piloto de FAD), pode levar ao aparecimento de bolhas grandes e turbulência, prejudiciais ao processo.

### 5.8. Estimativa da redução de sólidos e economia no custo operacional no tratamento caso a flotação por ar dissolvido seja implantada

Os benefícios advindos da implantação da flotação por ar dissolvido como pré-tratamento dos efluentes industriais da Citrosuco Paulista, unidade de

Matão, podem ser estimados. A unidade de flotação antecederia as unidades de lodo ativado e lagoas de estabilização. A seguir será mostrado qual seria a sua influência sobre os sistemas de lodo ativado e de lagoas de estabilização se fosse implantado.

Levando-se em conta que:

- a) a quantidade média de SST presente nos efluentes seja de 500 mg/l ( $0,5 \text{ kg/m}^3$ );
- b) 60 % dos efluentes são tratados no sistema de lodo ativado ( $320 \text{ m}^3/\text{h}$ );
- c) 28 % dos efluentes são tratados nas lagoas de estabilização ( $180 \text{ m}^3/\text{h}$ );
- d) Segundo a Citrosuco (1993) o afluente no sistema de lodo ativado tem em média 4.000 mg/l de DQO;
- e) Segundo a Citrosuco (1993) o afluente no sistema de lagoas tem em média 7.000 mg/l de DQO;
- f) Segundo a Citrosuco (1993), o custo operacional do sistema de lodos ativados é de US\$ 0,20/kg DQO;
- g) Segundo a Citrosuco (1993), o custo operacional do sistema de lagoas de estabilização é de US\$ 0,10/kg DQO.

O uso da FAD antes do sistema de lodo ativado e do sistema de lagoas poderá representar:

### 1) Redução da carga de sólidos suspensos nos sistemas:

#### 1.1) Lodo Ativado

A redução de SST nos efluentes vai depender da eficiência que a FAD no pré-tratamento alcance. Tomando como exemplo o ensaio com a unidade piloto de FAD, onde foi alcançado 95% de remoção de SST (ensaio 16), aliado ao uso de cloreto férrico (50 mg/l), teremos:

$$\text{Redução de SST} = 320 \text{ m}^3/\text{h} \times 24 \text{ h/dia} \times 0,5 \text{ kg/m}^3 \times 0,95 = 3.648 \text{ kg/dia}$$

ou seja, 3.648 kg por dia de sólidos será encaminhado a menos para aquela estação de tratamento, para uma eficiência de 95%.

### 1.2) Lagoas de Estabilização:

A redução de SST nos efluentes, mais uma vez, vai depender da eficiência que a FAD no pré-tratamento alcance. Tomando como exemplo o ensaio com a unidade piloto de FAD, onde foi alcançado 95% de remoção de SST (ensaio 16), aliado ao uso de cloreto férrico (50 mg/l), teremos:

$$\text{Redução de SST} = 180 \text{ m}^3/\text{h} \times 24 \text{ h/dia} \times 0,5 \text{ kg/m}^3 \times 0,95 = 2.052 \text{ kg/dia}$$

ou seja, 2.052 kg por dia de sólidos será encaminhado a menos para aquela estação de tratamento, para uma eficiência de 95%.

## 2) Redução no custo operacional:

### 2.1) Lodo Ativado

A economia no custo operacional no tratamento por lodo ativado está diretamente relacionada com a eficiência de remoção de DQO nos efluentes que a FAD no pré-tratamento alcance. Tomando como exemplo o ensaio com a unidade piloto de FAD, onde foi alcançado 26% (0,26) de remoção de SST (ensaio 16), aliado ao uso de cloreto férrico (50 mg/l), teremos:

$$\begin{aligned} \text{Economia} &= 320 \text{ m}^3/\text{h} \times 24 \text{ h/dia} \times 4 \text{ kg/m}^3 \text{ DQO} \times 0,26 \times \text{US\$ } 0,20/\text{kg DQO} = \\ &= \text{US\$ } 1.597,44 \text{ /dia} = \text{US\$ } 47.923,20 \text{ /mês} \end{aligned}$$

### 2.2) Lagoas de Estabilização:

A economia no custo operacional no tratamento por lagoas de estabilização também está diretamente relacionada com a eficiência de remoção de DQO nos efluentes que a FAD no pré-tratamento alcance. Tomando como exemplo o ensaio com a unidade piloto de FAD, onde foi alcançado 26% (0,26) de remoção de SST (ensaio 16), aliado ao uso de cloreto férrico (50 mg/l), teremos:

$$\begin{aligned} \text{Economia} &= 180 \text{ m}^3/\text{h} \times 24 \text{ h/dia} \times 7 \text{ kg/m}^3 \text{ DQO} \times 0,26 \times \text{US\$ } 0,10/\text{kg DQO} = \\ &= \text{US\$ } 786,24 \text{ /dia} = \text{US\$ } 23.587,20 \text{ /mês} \end{aligned}$$

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com a realização do presente trabalho permitem as seguintes conclusões:

- As águas residuárias estudadas apresentaram grande variação de qualidade, principalmente no que se refere aos valores de pH e de Sólidos Suspensos Totais. Os resultados encontrados no flotatestes e na instalação piloto de Flotação por Ar Dissolvido mostraram que a qualidade da água estudada exerce grande influência na eficiência de remoção de Sólidos Suspensos Totais, quando não foi aplicado cloreto férrico como coagulante (eficiências de remoção na faixa de 37% a 87%). A aplicação de dosagens de 50 e 100 mg/l de cloreto férrico, independente do controle do pH, possibilitou, de forma estável, obtenção de excelentes resultados de remoção de sólidos suspensos (na faixa de 85% a 96% de eficiência).
- Mesmo a taxas elevadas (TAS de 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d), a unidade de flotação foi operada com elevada eficiência (95 a 98%) de remoção de sólidos suspensos, com aplicação de 50 mg/l de cloreto férrico.
- Valores de A/S na faixa de 22/1000 a 65/1000, (associados à taxas de aplicação de até 200 m/dia) demonstraram ser adequados à flotação com aplicação de coagulante (50 mg/l de cloreto férrico).
- A aplicação da flotação no pré-tratamento dos efluentes líquidos da indústria cítrica estudada foi capaz de produzir lodo com teor de sólidos bastante elevado, sempre na faixa de 6,2 a 14,2%.
- O lodo produzido na unidade piloto de flotação apresentou, em massa, conteúdo protéico na faixa de 7,5 a 11,6%, teor de carboidratos na faixa de 1,7 a 1,9% e de

lipídeos na faixa de 0,0 a 7,5%. Tais valores pressupõe a potencialidade para o aproveitamento do lodo gerado através da sua incorporação ao bagaço de laranja, o qual é usualmente processado (peletizado) e utilizado na fabricação de ração bovina. Tal aproveitamento, além de significar ganho econômico para a indústria, constitui solução para o problema de disposição final do lodo gerado.

## 7. RECOMENDAÇÕES

- Realização de estudos envolvendo a aplicação da flotação como unidade de clarificação final do efluente da lagoa aerada existente na Citrosuco. Atualmente o efluente da referida lagoa é encaminhado à uma lagoa de sedimentação, a qual vem apresentando sérios problemas relacionados à presença de grande quantidade de sólidos flutuantes, que se acumulam na superfície da mesma, prejudicando seu desempenho.
- Estudo mais aprofundado da influência da FAD, aliado ao uso de cloreto férrico, nas remoções de sulfatos e sulfetos verificadas nos ensaios.
- Caracterização mais aprofundada do lodo obtido com o tratamento físico-químico por flotação, incluindo análises bromatológicas do mesmo, com vistas ao seu aproveitamento como ração animal.
- Usar cal para corrigir o pH na unidade de flotação, pois poderá ser incorporado no lodo, caso seja enviado para a fábrica de ração.
- Avaliar a presença de agrotóxicos no lodo flotado.
- Estudos visando avaliação da influência, na qualidade dos "pellets", da incorporação do material carbonizados removidos da água preta (na forma de Sólidos Suspensos).
- Aplicação da flotação no sistema de tratamento de águas residuárias de outras indústrias alimentícias, visando aproveitamento de material com valor nutricional para alimentação animal.



- Realizar estudo mais aprofundado só com a água preta, realizando uma bateria de ensaios, variando-se pH e dosagem de Cloreto Férrico, para viabilizar o seu tratamento individualizado.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRATBY, J. R.; AMBROSE, W. A. (1995). Design and control of flotation thickeners. In: IVES, K. J.; BERNHARDT, H. J., ed. *Flotation processes in water and sludge treatment*. 1.Ed. London, Water Science & Technology, 1995. V.31, n.3-4, p.247-261.
- BRATBY, J. R.; MARAIS, J. V. R. (1976). A guide for the design of dissolved-air (pressure) flotation systems for activated-sludge processes. *Water SA*, v. 2, p. 87.
- CITROSUCO (1993). Citrosuco e o meio ambiente. Folheto. Matão. s.n.t.
- CLEVENGER, T. E. (1990). Safety and efficacy of food processing sludges as animal feed: chemical characterization. *Research Journal of Water Pollution Control Federation*, v. 62, n. 6, p. 820-827, jun.
- EDZWALD, J. K. (1995). Principles and application of dissolved air flotation. In: IVES, K. J.; BERNHARDT, H. J., ed. *Flotation processes in water and sludge treatment*. 1.Ed. London, Water Science & Technology, 1995. V.31, n.3-4, p.1-23.
- FURTADO, R. (1994). *Receita para o suco*. Revista Globo Rural. v. 106, p. 83-92, ago.
- GOCHIN, R. J.; SOLARI, J. (1983). The role of hidrofobicity in dissolved air flotation. *Water Research*, Great Britain, v. 17, n. 6, p. 651 - 657, jun.

- GOPATRATNAM, V. C. et al. (1992). Effect of collector dosage on metal removal by precipitation/flotation. *Journal of Environmental Engineering*, v. 118, n. 6, p. 923 -948, nov/dec.
- GRANT, R. A. (1985). Biomass from wastes. Chapter 8, p. 336-337. S.n.t.
- HAHN, H. H. (1984). *Wastewater Treatment*. In Nato Advanced Institute on the Scientific Basis of Flotation, Cambridge, England, Proceedings, p. 379-414 (NATO ASI series).
- HO, C.C.; TAN, Y. K. (1989). Comparison of Chemical flocculation and dissolved air flotation of anaerobically treated palm oil mill effluent. *Water Research*, Great Britain, v. 23, n. 4, p. 395 - 400, apr.
- JUDICE, M. A. M. (1991). *Determinação de componentes extracelulares de lodos ativados*. São Carlos. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- LING, T. F. (1993). Modifying surface properties of sticky materials through polymer/surfactant adsorption: raising surface energy prevents deposition. *Pulp and Paper Canada 94*, v. 10, p. T273 - T279, oct.
- LIMA, J. B. (1993). *Desempenho de um sistema de lagoas de estabilização utilizado no tratamento de efluentes em indústria de processamento de cítricos*. São Carlos, 159p. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- LUCASSEN-REYNDERS, E. H. (1963). Contact angles and liquids. *Journal of Physical Chemistry*, v. 69, p. 969.
- METCALF & EDDY (1991). *Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse*. Third Edition, McGraw-Hill.
- PEREIRA, R.; RIBEIRO, P. H. (1993). *Levantamento das fontes poluidoras da Citrosuco Paulista S/A, Matão - SP*. Relatório Final de Estágio Profissional.

- REALI, M. A. P. (1991). *Avaliação de um sistema original para clarificação de águas de abastecimento utilizando o processo de flotação po ar dissolvido e filtração com taxa declinante*. São Carlos. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- REES, A. J.; RODMAN, D. J.; ZABEL, T. F. (1980). Evaluation of dissolved-air flotation saturator performance. WRC Technical Report TR-143, Water Research Center, Medmentram.
- RIJK, S. E.; GRAAF, J. M. V. D.; BLANKEN, J. G. D. (1994). Buble size in flotation thickening. *Water Research*, Great Britain, v. 28, n. 2, p. 465 - 473, feb.
- SOUZA, P. E. (1980). Tratamento dos despejos líquidos das indústrias cítricas. *Revista DAE*, São Paulo, v.127, n. 12, p. 53 - 64, dez.
- VIITASAARI, M.; JOKELA, P.; HEINÄNEN, J. (1995). Dissolved air flotation in the treatment of industrial wastewaters with a special emphasis on forest and foodstuff industries. In: IVES, K. J.; BERNHARDT, H. J., ed. *Flotation processes in water and sludge treatment*. 1.Ed. London, Water Science & Technology, 1995. V.31, n.3-4, p.299-313.
- ZABEL, T. F. (1984). *Flotation in water treatment*. In Nato Advanced Institute on the Scientific Basis of Flotation, Cambridge, England, Proceedings, p. 349-378 (NATO ASI series).