



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
LABORATÓRIO DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS**



DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE FLOTADOR ALTERNATIVO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA SINTÉTICA DA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

Jacqueline Fiuza dos Santos

Engenheira de Alimentos – UFRRJ (2000)

MSc em Engenharia de Alimentos – UNICAMP (2004)

Orientador: Prof. Dr. Ranulfo Monte Alegre

Tese de doutorado apresentada à
Faculdade de Engenharia de Alimentos
como requisito parcial para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia de
Alimentos.

Campinas – SP

Agosto de 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA FEA – UNICAMP

Sa59d Santos, Jacqueline Fiuza dos
Desenvolvimento e avaliação do desempenho de flotador alternativo para tratamento de água residuária sintética da indústria de alimentos / Jacqueline Fiuza dos Santos. – Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientador: Ranulfo Monte Alegre
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1. Flotação. 2. Água residuária. 3. Tratamento de efluentes.
I. Alegre, Ranulfo Monte. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.
(lpm/fea)

Titulo em inglês: Development and evaluation of an alternative flotator to treat synthetic dairy wastewater.

Palavras-chave em inglês (Keywords): Flotation, Wastewater, Effluent treatment

Titulação: Doutor em Engenharia de Alimentos

Banca examinadora: Ranulfo Monte Alegre

Bruno Coraucci Filho

Fernando Antonio Cabral

Jean Carlo Alanis

Mauro de Paula Moreira

Programa de Pós-Graduação: Programa em Engenharia de Alimentos

Banca Examinadora

Prof. Dr. Ranulfo Monte Alegre
DEA – FEA – UNICAMP
Orientador

Prof. Dr. Bruno Coraucci Filho
DSA – FEC – UNICAMP
Membro

Prof. Dr. Fernando Antônio Cabral
DEA – FEA – UNICAMP
Membro

Prof. Dr. Jean Carlo Alanis
Fundação Educacional de Barretos
Membro

Prof. Dr. Mauro de Paula Moreira
Faculdade Pitágoras
Membro

Dedico este trabalho

Aos meus pais, Jorge e Lisandre, por serem os principais responsáveis por mais esta vitória. Amo, respeito e admiro muito vocês.

Ao meu amado companheiro Gilvair por acreditar sempre em mim e pelo incentivo em todos os momentos.

Aos meus irmãos, Anderson e Lisandre, pelo incentivo e torcida. Apesar da distância física, estamos juntos.

Para que consigamos garantir um futuro digno para as crianças de hoje necessitamos adotar práticas mais sustentáveis quanto ao aproveitamento dos recursos naturais. A motivação deste trabalho é a tentativa de contribuir para o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis para tratamento de águas residuárias. Portanto, dedico também este trabalho a todas as crianças do Brasil e do mundo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e pelo amparo em todos os momentos.

Ao prof. Dr. Ranulfo Monte Alegre pela orientação, compreensão, paciência e amizade nestes anos de doutorado.

Aos membros da banca examinadora, professores doutores Bruno Coraucci Filho, Fernando Antônio Cabral, Jean Carlo Alanis e Mauro de Paula Moreira pelas excelentes sugestões que contrbuíram para melhoria do trabalho.

À professora Maria Helena Miguel (DEA) por ter cedido espaço em seu laboratório para realização de parte dos experimentos.

Ao Prof. Leone Covari, atual diretor do CEFET Cuiabá, por incentivar e apoiar a finalização deste trabalho.

Ao Prof. Ademir José Conte, ex diretor do CEFET Cuiabá, por permitir o afastamento de minhas atividades durante um semestre para finalização dos experimentos.

Aos professores do DEA e outros que tiveram grande colaboração na minha formação.

Aos funcionários do DEA e da FEA pela disponibilidade nos momentos em que precisei.

A técnica do laboratório Claudia de Oliveira Viana pela disponibilidade em todos os momentos em que precisei do seu auxílio e por ter se tornado uma amiga nestes dois últimos anos.

Ao técnico Isaías, pela disponibilidade, boa vontade e atendimento aos meus pedidos de socorro.

Aos funcionários da secretaria do DEA, Graça e Mauro, pela solicitude.

Ao Sr. Aparecido pela ajuda em diversos momentos.

Aos funcionários da secretaria de pós-graduação, Cosme e Marco, por estarem sempre dispostos a sanar minhas dúvidas.

Aos colegas de laboratório, pela convivência.

Aos amigos Olga, Margarita e Hugo que me receberam com muito carinho em sua morada.

Às amigas, Kelly, Pry e Ana, pela amizade.

À minha cunhada, Paula, e ao meu cunhado Isaac por fazerem meus amados irmãos mais felizes.

A CAPES pela bolsa de estudos concedida.

A todos que de certa forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar o desempenho de um flotador utilizando uma pedra porosa inserida na garganta de um Venturi modificado para formação de bolhas de ar, utilizadas para flotar partículas suspensas de leite após ajuste do pH a aproximadamente 4,6, no qual ocorre o ponto isoelétrico das proteínas do leite implicando na precipitação das mesmas. O uso do Venturi dispensa o uso de compressores e válvulas de redução de pressão para formação das bolhas de ar, essenciais na operação de flotação. Foram realizados ensaios em sistema descontínuo e contínuo para diferentes tempos de flotação, diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L) e de ar (Q_{ar}). A eficiência do sistema foi avaliada através da determinação da concentração de sólidos suspensos de leite floculado no afluente e no efluente do equipamento. Os resultados encontrados demonstraram que o flotador foi eficiente para remoção de partículas sólidas floculadas de água residuária láctea sintética tanto em sistema descontínuo quanto em contínuo, apresentando, respectivamente, eficiências máximas de separação de sólidos em torno de 100% e 70%. Portanto, os experimentos realizados em sistema descontínuo apresentaram melhores eficiências de separação de sólidos.

Palavras-chave: flotação, Venturi, água residuária, tratamento de efluentes, separação de sólidos.

ABSTRACT

The objective of this work was to develop and evaluate the performance of a flotator with a porous stone inserted in the modified Venturi throat for bubbles air formation, used to float suspended particles of milk after settlement of the pH to approximately 4.6, in which occurs the milk proteins isoelectric point implying in the proteins precipitation. The use of the Venturi excuses the use of steam and pressure reduction valves for bubbles air formation, essential in the flotation. It was carried out experiments in batch and continuous system for different flotation times, different wastewater recycle flow rates (Q_L) and air flow rates (Q_{ar}). The system efficiency was evaluated through the determination of the suspended solids concentration of the flocculated milk in the affluent and effluent of the equipment. The results found showed that the flotation equipment was efficient for flocculated solid particles removal from synthetic milky wastewater in batch and continuous system, with maximum solids separation efficiencies around 100% and 70%, respectively. Therefore the experiments carried out in batch system presented better solids removal efficiencies.

Keywords: flotation, Venturi, wastewater, effluent treatment, solids separation.

SUMÁRIO

	RESUMO.....	lx
	ABSTRACT.....	xi
	LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xvii
	NOMENCLATURA.....	xix
	LISTA DE FIGURAS.....	xxi
	LISTA DE TABELAS E QUADROS.....	xxvii
1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	5
2.1	OBJETIVO GERAL.....	5
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
3.1	NECESSIDADE DO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS.....	7
3.1.1	Água e poluição.....	7
3.1.2	Águas residuárias na indústria de alimentos.....	9
3.2	OPERAÇÕES DE SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO.....	11
3.3	FLOTAÇÃO: DEFINIÇÃO, TIPOS, VANTAGENS E APLICAÇÕES.....	13
3.3.1	Propriedades importantes no processo de flotação.....	16
3.3.1.1	Hidrofobicidade das partículas.....	16
3.3.1.2	Geração de bolhas em sistemas de flotação.....	19
3.3.1.3	Tamanho das partículas e flotabilidade.....	20
3.3.1.4	Adesão partícula-bolha.....	21
3.3.2	Aplicação da flotação ao tratamento de águas residuárias.....	23
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	31
4.1	DESCRIÇÃO DO FLOTADOR.....	31
4.2	ÁGUA RESIDUÁRIA UTILIZADA NA PESQUISA.....	34
4.3	OPERAÇÃO DO FLOTADOR EM SISTEMA DESCONTÍNUO.....	34
4.4	OPERAÇÃO DO FLOTADOR EM SISTEMA CONTÍNUO.....	35

4.4.1	Distribuição de tempo de residência (DTR).....	36
4.4.2	Experimentos realizados com o Venturi 3.....	36
4.4.3	Experimentos realizados com o Venturi 4.....	37
4.5	DETERMINAÇÃO DA TENSÃO SUPERFICIAL.....	38
4.6	DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS.....	38
4.7	EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS.....	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
5.1	EXPERIMENTOS CONDUZIDOS EM SISTEMA DESCONTÍNUO.....	41
5.1.1	Experimentos conduzidos com o primeiro Venturi (V1).....	41
5.1.2	Experimentos conduzidos com o segundo Venturi (V2).....	47
5.1.3	Experimentos conduzidos com o terceiro Venturi (V3).....	53
5.1.4	Experimentos conduzidos com o quarto Venturi (V4).....	59
5.1.5	Comparação entre os resultados obtidos pelos quatro tubos Venturi.....	67
5.2	EXPERIMENTOS CONDUZIDOS EM SISTEMA CONTÍNUO.....	76
5.2.1	Distribuição de tempo de residência (DTR).....	76
5.2.2	Experimentos conduzidos com o Venturi 3.....	79
5.2.3	Experimentos conduzidos com o Venturi 4.....	83
5.2.4	Experimentos conduzidos com o Venturi 3 e insuflação de ar.....	86
5.2.5	Tensão superficial.....	88
5.3	APLICAÇÃO DE BALANÇO DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO NO VENTURI.....	88
6	CONCLUSÕES.....	95
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	99
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
	APÊNDICE A.....	109
	APÊNDICE B.....	111
	APÊNDICE C.....	113
	APÊNDICE D.....	115

APÊNDICE E.....	117
APÊNDICE F.....	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DAF	Dissolved air flotation
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DTR	Distribuição de tempo de residência
FAD	Flotação por ar dissolvido
FAI	Flotação por ar induzido/disperso
IAF	Induced air flotation
TOC	Carbono Orgânico Total

NOMENCLATURA

A	Área	m^2
C	Concentração de sólidos ao final do tratamento/ efluente	$(g.L^{-1})$
C_o	Concentração de sólidos no início do tratamento/ afluente	$(g.L^{-1})$
D	Diâmetro	m
E	Eficiência de separação de sólidos	%
M	Peso molecular do ar	$Kg.Kmol^{-1}$
P	Pressão	Pa
Q_{al}	Vazão de alimentação do flotador nos experimentos em sistema contínuo	$(L.h^{-1})$
Q_{ar}	Vazão de ar aspirado pelo Venturi	$(L.h^{-1})$
Q_L	Vazão de reciclo de água residuária	$(L.h^{-1})$
R	Constante dos gases	$m^3.Pa.mol^{-1}.K^{-1}$
t	Tempo de reciclo de água residuária	(min)
t_h	Tempo de detenção hidráulico	(min)
$\bar{u}$	Velocidade média	$m.s^{-1}$
V_{&}	Vazão volumétrica	$m^3.s^{-1}$
w	Vazão mássica	$Kg.s^{-1}$
z	Altura	m
ρ	Densidade do fluido	$Kg.m^{-3}$

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Fenômenos de colisão e adesão (1), nucleação (2), aprisionamento de bolhas em flocos (3) e captura de partículas e agregados por microbolhas (4).....	22
Figura 4.1	Esquema simplificado do flotador usado nos experimentos conduzidos em sistema descontínuo.....	31
Figura 4.2	Esquema simplificado do flotador utilizado para os experimentos conduzidos em sistema contínuo.....	32
Figura 4.3	Representação do Venturi modificado, em corte longitudinal.....	33
Figura 4.4	Curva padrão de concentração de leite em função da absorbância.....	39
Figura 5.1	Vazão de ar (Q_{ar}) em função da vazão de água residuária recirculada (Q_L) através do Venturi 1.....	42
Figura 5.2	Eficiência de separação de sólidos dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 1 em função da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) para diferentes tempos de flotação.....	43
Figura 5.3	Eficiência de separação de sólidos por flotação dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 1 em função do tempo de reciclo para diferentes vazões de reciclo (Q_L).....	44
Figura 5.4	Eficiência de separação de sólidos por flotação dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 1 (Letras maiúsculas: mesma vazão de reciclo de água residuária, diferentes tempos. Letras minúsculas: mesmo tempo, diferentes vazões de reciclo de água residuária).....	47
Figura 5.5	Vazão de ar (Q_{ar}) em função da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) no Venturi 2.....	48
Figura 5.6	Eficiência de separação de sólidos dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 2 em função da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) para diferentes tempos de flotação.....	49
Figura 5.7	Eficiência de separação de sólidos por flotação dos	

	experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 2 em função do tempo para diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L)	50
Figura 5.8	Eficiência de separação de sólidos por flotação dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 2 (Letras maiúsculas: mesma vazão de reciclo de água residuária, diferentes tempos. Letras minúsculas: mesmo tempo, diferentes vazões de reciclo de água residuária).....	53
Figura 5.9	Vazão de ar (Q_{ar}) em função da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) no Venturi 3.....	54
Figura 5.10	Eficiência de separação de sólidos por flotação dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 3 em função da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) para diferentes tempos de flotação.....	55
Figura 5.11	Eficiência de separação de sólidos por flotação dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 3 em função do tempo (min) para diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L).....	56
Figura 5.12	Eficiência de separação de sólidos por flotação dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 3 (Letras maiúsculas: mesma vazão de reciclo de água residuária (Q_L), diferentes tempos. Letras minúsculas: mesmo tempo, diferentes vazões de reciclo de água residuária).....	57
Figura 5.13	Vazão de ar (Q_{ar}) em função da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) no Venturi 4.....	60
Figura 5.14	Eficiência de separação de sólidos dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 4 em função da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) para diferentes tempos de flotação.....	61
Figura 5.15	Eficiência de separação de sólidos por flotação dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 4 em função do tempo para diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L)	62
Figura 5.16	Eficiência de separação de sólidos por flotação dos	

	experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 4 (Letras maiúsculas: mesma vazão de reciclo de água residuária, diferentes tempos).....	63
Figura 5.17	Eficiência de separação de sólidos em função da vazão de reciclo de água residuária para os experimentos conduzidos com os quatro tubos Venturi estudados - tempo de flotação de 15 min.....	68
Figura 5.18	Eficiência de separação de sólidos para os experimentos conduzidos com os quatro tubos Venturi estudados para diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L) para tempo de flotação de 15 min – Teste de Tukey.....	69
Figura 5.19	Eficiência de separação de sólidos em função da vazão de água residuária para os experimentos conduzidos com os quatro tubos Venturi estudados - tempo de flotação de 30 min.....	70
Figura 5.20	Eficiência de separação de sólidos dos experimentos conduzidos com os quatro tubos Venturi estudados para diferentes vazões de água residuária (Q_L) e tempo de flotação de 30 min – Teste de Tukey (Letras maiúsculas: mesma vazão de reciclo de água residuária, diferentes tempos).....	71
Figura 5.21	Eficiência de separação de sólidos em função da vazão de reciclo de água residuária para os experimentos conduzidos com os quatro tubos Venturi estudados - tempo de flotação de 45 min.....	72
Figura 5.22	Eficiência de separação de sólidos dos experimentos conduzidos com os quatro tubos Venturi para diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L) para tempo de flotação de 45 min – Teste de Tukey.....	73
Figura 5.23	Eficiência de separação de sólidos em função da vazão de reciclo de água residuária para os experimentos conduzidos com os quatro tubos Venturi estudados - tempo de flotação de 60 min.....	74

Figura 5.24	Eficiência de separação de sólidos para os experimentos conduzidos com os quatro tubos Venturi estudados para diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L) para tempo de flotação de 60 min – Teste de Tukey.....	75
Figura 5.25	Distribuição da concentração ao longo do tempo nas seguintes condições: (a) $t_h = 15$ min, $Q_{al} = 400$ L.h ⁻¹ , $Q_L = 700$ L.h ⁻¹ ; (b) $t_h = 15$ min, $Q_{al} = 400$ L.h ⁻¹ , $Q_L = 1000$ L.h ⁻¹	77
Figura 5.26	Distribuição da concentração ao longo do tempo nas seguintes condições: (a) $t_h = 60$ min, $Q_{al} = 100$ L.h ⁻¹ , $Q_L = 700$ L.h ⁻¹ ; (b) $t_h = 60$ min, $Q_{al} = 100$ L.h ⁻¹ , $Q_L = 1000$ L.h ⁻¹	78
Figura 5.27	Concentração e eficiência de separação de sólidos no flotador operando em sistema contínuo nas seguintes condições: (a) $t_h = 15$ min, $Q_{al} = 400$ L.h ⁻¹ , $Q_L = 800$ L.h ⁻¹ ; (b) $t_h = 15$ min, $Q_{al} = 400$ L.h ⁻¹ , $Q_L = 1100$ L.h ⁻¹	80
Figura 5.28	Concentração e eficiência de separação de sólidos no flotador operando em sistema contínuo nas seguintes condições: (a) $t_h = 30$ min, $Q_{al} = 200$ L.h ⁻¹ , $Q_L = 800$ L.h ⁻¹ ; (b) $t_h = 30$ min, $Q_{al} = 200$ L.h ⁻¹ , $Q_L = 1100$ L.h ⁻¹	81
Figura 5.29	Concentração e eficiência de separação de sólidos no flotador operando em sistema contínuo nas seguintes condições: (a) $t_h = 60$ min, $Q_{al} = 100$ L.h ⁻¹ , $Q_L = 800$ L.h ⁻¹ ; (b) $t_h = 60$ min, $Q_{al} = 100$ L.h ⁻¹ , $Q_L = 1100$ L.h ⁻¹	83
Figura 5.30	Concentração e eficiência de separação de sólidos no flotador operando em sistema contínuo sem a pedra porosa para: (a) $t_h = 15$ min, $Q_{al} = 400$ L.h ⁻¹ , $Q_L = 800$ L.h ⁻¹ ; (b) $t_h = 15$ min, $Q_{al} = 400$ L.h ⁻¹ , $Q_L = 1900$ L.h ⁻¹	84
Figura 5.31	Concentração e eficiência de separação de sólidos no flotador operando em sistema contínuo sem a pedra porosa para: (a) $t_h = 30$ min, $Q_{al} = 200$ L.h ⁻¹ , $Q_L = 800$ L.h ⁻¹ ; (b) $t_h = 30$ min, $Q_{al} = 200$ L.h ⁻¹ , $Q_L = 1900$ L.h ⁻¹	85
Figura 5.32	Concentração e eficiência de separação de sólidos no flotador	

	operando em sistema contínuo sem a pedra porosa para: $t_h = 60 \text{ min}$, $Q_{al} = 100 \text{ L.h}^{-1}$, $Q_L = 800 \text{ L.h}^{-1}$	86
Figura 5.33	Concentração e eficiência de separação de sólidos no flotador operando em sistema contínuo com a pedra porosa e insuflação de ar por bombas de “aquário” para: (a) $t_h = 30 \text{ min}$, $Q_{al} = 200 \text{ L.h}^{-1}$, $Q_L = 800 \text{ L.h}^{-1}$; (b) $t_h = 30 \text{ min}$, $Q_{al} = 200 \text{ L.h}^{-1}$, $Q_L = 1100 \text{ L.h}^{-1}$	87
Figura 5.34	Representação do Venturi subdividido em 4 secções: cone de entrada (1), garganta (2), cone de saída (3), tubo de sucção de ar (4).....	89

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 3.1	Características gerais de algumas águas residuárias industriais.....	10
Tabela 3.2	Características quanto a natureza/estrutura do floco para aplicações específicas.....	12
Tabela 4.1	Composição do leite em pó integral Itambé.....	34
Tabela A1	Dados da curva padrão de concentração de leite em pó.....	109
Tabela A2	Vazões de ar (Q_{ar}) em função da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) para cada Venturi estudado.....	109
Tabela B1	Eficiência de separação de sólidos (%) do flotador com o Venturi 1.....	111
Tabela B2	Valores médios de eficiência de separação de sólidos (%) do flotador usando o Venturi 1 calculados pelo Statistica 5.0.....	111
Tabela C1	Eficiência de separação de sólidos (%) do flotador com o Venturi 2.....	113
Tabela C2	Valores médios de eficiência de separação de sólidos (%) do flotador usando o Venturi 2 calculados pelo Statistica 5.0.....	113
Tabela D1	Eficiência de separação de sólidos (%) do flotador com o Venturi 3.....	115
Tabela D2	Valores médios de eficiência de separação de sólidos (%) do flotador usando o Venturi 3 calculados pelo Statistica 5.0.....	116
Tabela E1	Eficiência de separação de sólidos (%) do flotador com o Venturi 4.....	117
Tabela E2	Valores médios de eficiência de separação de sólidos (%) do flotador usando o Venturi 4 calculados pelo Statistica 5.0.....	118
Tabela F1	Dados utilizados para elaboração dos gráficos de Distribuição de tempo de residência (DTR).....	119
Tabela F2	Valores de eficiência dos experimentos conduzidos com o Venturi 3.....	119

Tabela F3	Valores de eficiência dos experimentos conduzidos com o Venturi 4.....	120
Tabela F4	Valores de eficiência dos experimentos conduzidos com o Venturi 3 e insuflação de ar para tempo de detenção de 30 min	120
Quadro 4.1	Condições de operação dos ensaios em sistema contínuo com o Venturi 3.....	37
Quadro 4.2	Condições de operação dos ensaios em sistema contínuo com o Venturi 4.....	37

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Lei Federal nº 9.443, de 8 de janeiro de 1997, a água é um bem de domínio público, sendo um recurso natural limitado, dotado de valor econômico. Ainda de acordo com a referida lei são objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos (BRASIL, 1997). Percebe-se então, que a água é cada vez mais considerada um recurso natural valioso que não deve ser desperdiçado, devendo ser utilizado de maneira racional para que as crianças de hoje tenham o direito ao uso de água de qualidade garantido amanhã.

Neste sentido, o descarte de efluentes líquidos nos corpos receptores é um dos principais responsáveis pela poluição hídrica. Sobre esta questão a Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água, após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos na própria resolução ou em outras normas aplicáveis.

Diante da exigência da legislação todos os efluentes produzidos, de origem doméstica ou industrial, devem ser tratados para que não estejam sujeitos às sanções da lei, tornando-se uma preocupação crescente dos órgãos competentes e da sociedade como um todo. Neste sentido existe uma ampla divulgação entre os diversos setores da sociedade para as seguintes ações em relação ao uso da água: redução do consumo, reutilização e reciclagem/tratamento, visando melhor uso deste indispensável recurso limitado.

Dentre os inúmeros processos existentes relacionados ao tratamento de água e efluentes encontra-se a flotação que é um processo de concentração de fases amplamente utilizado no beneficiamento de minérios e que vem encontrando, cada vez mais, vasta aplicação no tratamento de efluentes líquidos sobretudo, quando existe pequena diferença de densidade entre as fases ou

quando o material que se deseja separar tem caráter hidrofóbico. Neste sentido, a aplicação ambiental da flotação é mais difundida na engenharia civil (sanitária), química e de alimentos (RODRIGUES; RUBIO, 2007).

A flotação pode ser aplicada para separar partículas sólidas de baixa densidade ou líquidas de uma fase líquida em diversos processos. Dentre as possíveis aplicações, encontra-se o tratamento de efluentes para remoção de sólidos da fase líquida, em especial. De maneira geral, a flotação pode ser conduzida de duas maneiras (CHUNG et al., 2000; RUBIO et al., 2002):

1. Flotação por ar induzido (disperso) (FAI) - Borbulhando-se ar no líquido contendo matéria suspensa para flotá-la até a superfície. Posteriormente a matéria é raspada e removida na superfície do líquido. São formadas bolhas maiores que 100 μ m.
2. Flotação por ar dissolvido (FAD) - Saturando-se o líquido com ar comprimido em um tanque de saturação e lançando-o em seguida dentro de um tanque de flotação a uma pressão mais baixa, gerando micro-bolhas (10-100 μ m de diâmetro), que sobem através do líquido carregando a matéria suspensa para a superfície. A matéria é então raspada e removida na superfície do líquido.

Existem vários trabalhos na literatura sobre o uso da flotação para tratamento de águas residuárias, incluindo recuperação de proteínas (SCHNEIDER et al., 1994); remoção de óleo (ZOUBOULIS; AVRANAS, 2000; AL-SHAMRANI et al., 2002); remoção de minerais (JOKELA et al., 2001); remoção de algas (EDZWALD, 1993); tratamento de efluentes de abatedouros (LOVETT; TRAVERS, 1986); adensamento de lodo (RIJK et al., 1994); associação a outros processos, como por exemplo UASB e filtração por membrana (MANJUNATH et al., 2000; BLÖCHER et al., 2003; MINHALMA; PINHO, 2001); ampliação de escala (CHUNG et al., 2000). Existem ainda outros estudos relativos a determinação de propriedades relacionadas às bolhas de ar em sistemas de flotação (ASLAN et al., 2006; GALLEGOS-ACEVEDO et al., 2006; GIRGIN et al., 2006; NGUYEN(a) et al., 2006) .

De maneira geral, os sistemas convencionais para tratamento de efluentes por flotação exigem o uso de bomba, compressor, tanque de pressurização e válvula de redução de pressão. Em contrapartida, neste trabalho estudou-se a montagem e avaliação do desempenho de um flotador, que contemplou o uso de uma pedra porosa inserida na garganta de um Venturi modificado como alternativa simples e barata para formação de bolhas de ar utilizadas na flotação, com menor custo de produção, operação e manutenção, sendo de fácil substituição.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa foi desenvolver e avaliar o desempenho de um flotor para remoção de sólidos suspensos de água residuária sintética floculada de leite, utilizando um dispositivo alternativo, neste caso, um Venturi modificado, para formação das bolhas de ar o que dispensa a utilização de compressores, tanque de pressurização e válvulas de redução de pressão.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentre os objetivos específicos tem-se:

- Construir um flotor utilizando um tubo Venturi modificado com uma pedra porosa inserida em sua garganta para formação de bolhas de ar.
- Testar o flotor com água residuária sintética.
- Fazer modificações no Venturi e comparar a eficiência de separação de sólidos.
- Testar o equipamento em sistema descontínuo.
- Testar o equipamento em sistema contínuo.
- Testar diferentes vazões de reciclo de água residuária e comparar as eficiências de separação de sólidos.
- Testar diferentes tempos de reciclo de água residuária (t) nos ensaios em sistema descontínuo e comparar as eficiências de separação de sólidos.

- Testar diferentes tempos de detenção hidráulico (t_h) nos ensaios em sistema contínuo e comparar as eficiências de separação de sólidos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A flotação ainda hoje é bastante aplicada no beneficiamento de minérios e existem muitos trabalhos disponíveis na literatura abordando a sua aplicação para esta finalidade. Além disso, a maior parte dos trabalhos encontrados na literatura referem-se a flotação por ar dissolvido (FAD). Diante destas questões torna-se praticamente inviável fazer um levantamento bibliográfico na literatura relacionado especificamente ao assunto desta pesquisa, enquadrando-se, apenas a título de classificação, num tipo de flotação por ar disperso/induzido.

Neste sentido, esta revisão bibliográfica concentrar-se-á no levantamento de pesquisas tão recentes quanto possível sobre o uso da flotação, por ar dissolvido (FAD) ou por ar induzido/disperso (FAI), para tratamento de águas residuárias.

3.1 NECESSIDADE DO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

3.1.1 Água e poluição

De acordo com Soares (2007) 97,40% da água existente no planeta Terra encontra-se nos oceanos na forma de água salgada, 2,30% encontra-se em geleiras polares e glaciais e em águas subterrâneas em grandes profundidades (> 800 m), 0,29% encontra-se em águas subterrâneas em baixas profundidades (< 800 m) e apenas 0,01% encontra-se disponível na forma de rios e lagos. Percebe-se então que embora a Terra seja conhecida como “planeta água”, a quantidade de água mais facilmente disponível para os diferentes usos humanos é realmente muito pequena, compreendendo as águas subterrâneas em baixa profundidade e as águas de rios e lagos, totalizando apenas 0,30% de toda a água existente no planeta. Neste sentido a preocupação com a correta utilização da água e com a não poluição ou despoluição da mesma é cada vez mais crescente.

De acordo com a Lei Federal nº 6.938 de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação além de dar outras providências, entende-se como poluição a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente:

- a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas;
- c) afetem desfavoravelmente a biota;
- d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente;
- e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos.

Considera ainda degradação da qualidade ambiental como sendo a alteração adversa das características do meio ambiente, que seria o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas. O conceito de poluição estaria relacionado então a alteração de determinado ambiente que se encontra em equilíbrio ambiental, por exemplo a introdução de água residuária industrial em determinado corpo receptor (BRASIL, 1981).

A indústria utiliza entre 20 e 25% da água doce e a sua demanda tem aumentado drasticamente. A previsão é de que antes de 2025 dobrem estes percentuais. A América Latina hospeda mais de 800 áreas de livre comércio, linhas de montagem de bens de consumo global necessitando de grande suprimento de água. A produção agroindustrial reivindica 65 a 70% do restante das águas usadas pelos seres humanos e, grande parte para as grandes propriedades de agricultura industrial (MEDEIROS, 2005).

O setor de alimentos destaca-se dentre as atividades industriais do ponto de vista ambiental por apresentar grande consumo de água e alta geração de efluentes por unidade produzida (MAVROV; BELIÈRES, 2000; GALAMBOS et al., 2004), além de gerar um grande volume de lodo nas estações de tratamento biológico (RAMJEAWON, 2000).

Desta maneira, entende-se que é necessário envidar esforços no estudo de tecnologias de tratamento de águas residuárias da indústria de alimentos, além de buscar alternativas para redução tanto do consumo de água quanto da quantidade de efluentes gerados por este tipo de indústria.

3.1.2 Águas residuárias na indústria de alimentos

A água é utilizada pela indústria de alimentos de diferentes formas, dentre elas: águas utilizadas diretamente nas etapas do processamento industrial ou incorporadas aos produtos; lavagem de máquinas, tubulações e pisos; águas de sistemas de resfriamento e geradores de vapor e esgotos sanitários dos funcionários. Excluindo-se o volume de água incorporado ao produto e perdido por evaporação, as águas tornam-se contaminadas por resíduos do processo industrial ou por perdas de energia térmica, originando assim os efluentes líquidos. Os efluentes líquidos a serem despejados com os seus poluentes característicos causam a alteração da qualidade dos corpos receptores e conseqüentemente a sua poluição. Historicamente, o desenvolvimento urbano e industrial ocorreu ao longo dos rios devido à disponibilidade de água para abastecimento e a possibilidade de utilizar o rio como corpo receptor dos dejetos. O fato preocupante é o aumento das populações, bem como das atividades industriais levando ao aumento do número de vezes em que um mesmo corpo d'água recebe dejetos urbanos e industriais (GIORDANO, 2005).

As indústrias de processamento de alimentos produzem grande quantidade de efluentes que se não tratados de forma adequada podem causar forte impacto ambiental ao entrarem em contato com corpos receptores d'água.

Soares (2007) considera que na seleção de um determinado processo de tratamento de águas residuárias deve-se primeiro analisar as características das mesmas para que seja identificado qual o nível de tratamento que deve ser aplicado para chegar aos parâmetros exigidos pela legislação.

As características de determinado tipo de água residuária industrial vai depender de alguns fatores, dentre eles, a matéria-prima processada, os processos utilizados e o produto final que se está produzindo.

Tabela 3.1 – Características gerais de algumas águas residuárias industriais.

Gênero	Tipo	Unidade de produção	Consumo esp. de água (m³.unid⁻¹)	Carga esp. de DBO (kg.unid⁻¹)	Conc. de DBO (mg.L⁻¹)
Alimentícia	- Conservas	1 ton	4-50	30	600-7500
	- Doces	1 ton	5-25	2-8	200-1000
	- Açúcar de cana	1 ton açúcar	0,5-10	2-5	250-5000
	- Laticínio sem queijaria	1000 L (leite)	1-10	1-4	300-2500
	- Laticínio com queijaria	1000 L (leite)	2-10	5-40	500-4000
	- Margarina	1 ton	20	30	1500
	- Matadouros	1 boi / 2,5 porcos	0,3-0,4	4-10	15000- 20000
	- Produção de levedura	1 ton	150	1100	7500
Bebidas	- Destilação de álcool	1 ton	60	220	-
	- Cervejaria	1 m ³	5-20	8-20	3500
	- Refrigerantes	1 m ³	2-5	3-6	500-4000
	- Vinho	1 m ³	5	0,25	600-2000

Fonte: Adaptado de von Sperling (1996). Notas: Esp. = específico; Conc.= Concentração.

A Tabela 3.1 apresenta as características de algumas águas residuárias de origem industrial da área de alimentos e bebidas.

É importante ressaltar que os dados apresentados na Tabela 3.1 vêm se modificando a cada dia já que as indústrias vêm concentrando esforços no sentido de reduzir o consumo de água, bem como a quantidade de efluente gerado, promovendo ações para o reuso e reciclagem de águas utilizadas em suas diversas atividades produtivas (SOARES, 2007).

Existem diversos processos de tratamento de águas residuárias sendo que normalmente é utilizada uma combinação de processos de tratamento para que seja atingida melhor qualidade do efluente final.

3.2 OPERAÇÕES DE SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO

A separação de sólidos de uma fase aquosa é de extrema importância em diversas áreas incluindo o tratamento de águas residuárias. Existem vários sistemas para separação sólido-líquido, dentre os quais, os mais estudados são: sedimentação, filtração e flotação. Para seleção do processo a ser utilizado para separação dos sólidos é necessário considerar as características relativas a natureza dos sólidos a serem separados, conforme é possível observar na Tabela 3.2 a seguir (MOUDGIL; BEHL, 1995).

A remoção por sedimentação é baseada na diferença de gravidade específica entre partículas sólidas e o líquido (METCALF & EDDY, Inc., 1991).

Pode-se dizer que a sedimentação é a separação da água, por decantação gravitacional, de partículas suspensas que são mais pesadas que a água. É uma das operações unitárias mais usadas no tratamento de efluentes líquidos. Podem ser utilizados os termos sedimentação e decantação para denominar esta operação (COSSICH, 2006).

Tabela 3.2 – Características quanto a natureza/estrutura do floco para aplicações específicas.

Método de separação	Propriedades desejadas para o floco
Filtração	Poroso, forte, permeável.
Sedimentação	Denso, forte, grande, forma regular.
Centrifugação	Forte, denso, grande.
Flotação	Baixa densidade, forte, distribuição de tamanho estreita.

Fonte: Adaptado de Moudgil e Behl (1995).

A sedimentação pode ser usada para remoção de areia, remoção de material particulado no tanque de sedimentação primária, para remoção de flocos biológicos no tanque de sedimentação de lodos ativados, para remoção de flocos químicos quando o processo de floculação química é usado, para concentração de sólidos nos espessadores de lodo, entre outros. Na maioria dos casos, o principal objetivo é produzir um efluente clarificado, mas é também necessário produzir um lodo com concentração de sólidos que pode ser facilmente manuseado e tratado (COSSICH, 2006).

Decantadores primários são empregados em sistemas de lodos ativados convencionais, objetivando remover sólidos em suspensão sedimentáveis. Dependendo das características das águas residuárias é possível eliminar de 40 a 60% dos sólidos em suspensão e de 20 a 40% da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) (COSSICH, 2006).

Embora a filtração seja uma das principais operações unitárias usadas no tratamento de água potável, a filtração dos efluentes de processos de tratamento de resíduos líquidos é uma prática relativamente recente. A filtração é usada para

alcançar remoções suplementares de sólidos suspensos de efluentes de tratamentos biológicos e químicos (COSSICH, 2006).

O projeto de filtros e a predição de seu desempenho devem ser baseados no entendimento das variáveis que controlam o processo e no conhecimento dos mecanismos pertinentes responsáveis pela remoção da matéria particulada de um resíduo líquido (COSSICH, 2006).

3.3 FLOTAÇÃO: DEFINIÇÃO, TIPOS, VANTAGENS E APLICAÇÕES

De acordo com a literatura, a flotação é uma tecnologia de separação sólido-líquido pela qual os sólidos em suspensão são recuperados por meio de adsorção às bolhas de ar. Agregados de partículas e bolhas com densidades menores que a própria suspensão sobem para a superfície e são removidos. Pode-se dizer que é o oposto da separação sólido-líquido por sedimentação e é utilizada principalmente para separação de partículas de baixa densidade, hidrofóbicas, finas e coloidais (METCALF & EDDY, Inc., 1991; SVAROVSKY, 1981).

França (2003) define a flotação como sendo um processo de separação de partículas via adesão de bolhas. O aglomerado formado a partir da união partícula-bolha apresenta densidade menor que a do meio aquoso e flutua até a superfície do tanque de flotação de onde as partículas são removidas.

A flotação pode ser considerada ainda como uma operação unitária usada para separar partículas sólidas ou substâncias líquidas de uma fase líquida na qual partículas de baixa densidade ou partículas hidrofóbicas são separadas da fase aquosa através da introdução de bolhas de ar.

Trata-se de um método de separação que abrange inúmeras aplicações no âmbito de beneficiamento mineral, sendo que nos últimos anos tem sido de fundamental importância para o tratamento de efluentes e na reciclagem de

materiais de valor econômico. A flotação é um processo simples, flexível e eficiente, requer pouco espaço físico, gera pequeno e concentrado volume de lodo (SCHOENHALS, 2006).

No tratamento de efluentes líquidos, a flotação é usada principalmente para remover matéria suspensa e para concentrar lodos biológicos. A principal vantagem da flotação sobre a sedimentação é que partículas muito pequenas ou leves, que decantam lentamente, podem ser removidas mais completamente e num tempo menor. Uma vez que as partículas deslocam-se para a superfície, elas podem ser coletadas por uma operação de retirada de espuma (COSSICH, 2006).

Além disso, o grau de remoção pode ser aumentado com o uso de vários aditivos químicos, usados para auxiliar o processo de flotação. Estes compostos, na maior parte, criam uma superfície ou estrutura que absorve ou aprisiona facilmente bolhas de ar. Compostos químicos inorgânicos, tais como sais de alumínio e ferro e sílica ativada, podem ser usados para se ligar à matéria particulada e assim criar uma estrutura que aprisione bolhas de ar. Vários polímeros orgânicos podem ser usados para mudar a natureza da interface ar-líquido e sólido-líquido ou ambas (COSSICH, 2006).

Como a flotação é dependente do tipo de superfície da matéria particulada, testes de laboratório e piloto devem ser realizados para fornecer critérios de projeto. Fatores que devem ser considerados no projeto de unidades de flotação incluem a concentração de matéria particulada, quantidade de ar usado, velocidade de ascensão das partículas e a taxa de carregamento de sólidos (COSSICH, 2006).

Dentre os diversos tipos de flotação existentes, pode-se dizer que os mais conhecidos são a flotação por ar dissolvido - FAD (dissolved air flotation - DAF) e a flotação por ar induzido/ disperso - FAI (induced air flotation - IAF).

A flotação por ar dissolvido consiste em saturar a água residuária tratada com ar sob pressão e transportá-la para um tanque de flotação circular ou

retangular através de um bocal ou válvula. A redução da pressão resulta na perda de ar da solução sob a forma de pequenas bolhas, que colidem com a fase dispersa e a carregam para a superfície (SVAROVSKY, 1981; METCALF & EDDY, Inc., 1991). Este tipo de flotação está recebendo muita atenção como um processo efetivo para separação sólido-líquido em tecnologia de tratamento de água (CHUNG et al., 2000).

Couto et al. (2004) utilizaram a flotação por ar dissolvido (FAD) para tratamento de efluente da indústria de leite. Inicialmente foram feitos estudos em batelada em coluna de acrílico de diâmetro externo de 2,5 cm e altura de 50 cm e em seguida foi avaliado o desempenho de um tanque com capacidade de 5,5 L para tratamento da mesma água residuária operando de maneira contínua. De acordo com os resultados da flotação em batelada foi possível obter eficiências de separação de leite floculado em torno de 98,5% para tempo de operação de 5 minutos e pressão de saturação de 4 atm. Pelo fato de pressões de saturação maiores que 4 atm não melhorarem a eficiência de flotação, esta foi a pressão utilizada nos experimentos operados de maneira contínua. Neste caso, foram obtidas eficiências de separação acima de 90% para os experimentos conduzidos a pressão de saturação de 4 atm e taxa de $Q_a/Q_{LS} = 1$, onde Q_a é a taxa de alimentação de água residuária e Q_{LS} é a taxa de líquido saturado com ar.

A flotação por ar induzido/disperso consiste na formação de bolhas de ar através da introdução de uma fase gasosa diretamente dentro da fase líquida por um impelidor giratório ou por difusores (METCALF & EDDY, Inc., 1991).

Zlokarnik (1998) estudou a flotação por ar induzido (FAI) para remoção de biomassa de água residuária tratada. Em comparação a flotação por ar dissolvido (FAD) a FAI necessita de apenas 10% da vazão total de líquido para geração das bolhas de ar e não requer tanque pressurizado e nem compressor.

Uma das vantagens da flotação é que partículas muito pequenas, ou muito leves, que sedimentam lentamente, podem ser removidas mais completamente e em menor tempo (METCALF & EDDY, Inc., 1991). Neste sentido a flotação pode

ser aplicada em diversos processos onde seja necessário separar partículas de baixa densidade e/ou hidrofóbicas. Dentre as diversas aplicações, encontra-se o tratamento de efluentes líquidos para remoção da matéria supensa e a concentração de lodo formado a partir de tratamento biológico.

A flotação é um processo de tratamento de água residuária para remoção de sólidos suspensos, óleos, graxas, fibras e outros sólidos de baixa densidade ou hidrofóbicos bem como para adensamento de lodo ativado (VALSARAJ, 1995).

3.3.1 Propriedades importantes no processo de flotação

Existem alguns aspectos importantes a serem considerados para realização do processo de flotação, dentre os quais destacam-se: hidrofobicidade das partículas, geração de bolhas em processos de flotação, relação dos tamanhos partícula/bolha e grau de turbulência na suspensão.

3.3.1.1 Hidrofobicidade das partículas

A tendência das partículas em substituir sua interface sólido-líquido pela interface sólido-ar, como acontece durante a interação bolha-partícula, é comumente chamada hidrofobicidade (FREUND; DOBIÁŠ, 1995). O que ocorre neste caso é que a tendência de repulsão das partículas pela água aumenta quando estas são ou tornam-se hidrofóbicas enquanto que a adesão ou interação entre partículas e bolhas aumenta, sendo este um dos fatores responsáveis por um bom desempenho do processo de flotação.

Neste sentido, Reinders e Lucassen (1984) afirmam que uma das condições para boa agregação das partículas sólidas de uma suspensão aquosa à fase gasosa durante a flotação é que as partículas devem ter mais afinidade pela fase gasosa que pela fase aquosa, o que significa que as partículas devem ser mais hidrofóbicas do que hidrofílicas.

Grande parte das partículas sólidas que ocorrem na natureza e a maioria dos precipitados químicos inorgânicos são hidrofílicos, ou seja, têm forte afinidade pela água. O estudo da flotação soluciona este problema convertendo sólidos hidrofílicos em hidrofóbicos pela adsorção de materiais ativos à superfície dos mesmos. Desta maneira, determinada partícula passa de hidrofílica a hidrofóbica, facilitando o processo de flotação (REINDERS; LUCASSEN, 1984).

Vale ressaltar que quanto mais hidrofóbicas forem as partículas que deseja-se separar por flotação, mais facilmente este processo ocorrerá, ao passo que se as partículas tiverem maior afinidade pela água, ou seja, forem partículas hidrofílicas, haverá maior dificuldade para que ocorra o processo de flotação.

Quando o efluente a ser tratado apresenta partículas finas (suspensões coloidais) que apresentam grande estabilidade devido a sua pequena dimensão e a existência de cargas superficiais que promovem a sua repulsão, os métodos físicos de separação somente não são efetivos. Um dos métodos utilizados para desestabilizar essas suspensões é a coagulação através da adição de produtos químicos (SCHOENHALS, 2006).

Pode-se dizer que colóide é uma dispersão de partículas de um material em outro denominando-se sol quando uma partícula em fase sólida está dispersa em uma fase líquida, ou uma dispersão de um sólido em um sólido; emulsão quando ocorre dispersão de um líquido em um líquido; aerosol quando ocorre dispersão de um líquido ou um sólido em um gás (SCHOENHALS, 2006).

Quando se tem água como solvente, um sólido pode ser hidrofóbico ou hidrofílico. Colóides hidrofóbicos são os que repelem a água, tendo como fase dispersa material insolúvel em água e ocorrem em maior frequência nas águas para abastecimento. Colóides hidrofílicos são solúveis em água, atraindo para perto de si moléculas do meio dispersivo, formando uma película protetora e tornando o colóide bastante estável o que dificulta a coagulação e a floculação (SCHOENHALS, 2006).

O tamanho das partículas coloidais situa-se entre 10^{-3} e $1\ \mu\text{m}$. As partículas coloidais apresentam cargas elétricas que produzem forças de repulsão suficientemente grandes, a ponto de mantê-las separadas em suspensão. Ao desestabilizar as cargas, as partículas coloidais se aglomeram progressivamente, possibilitando sua separação. As forças de atração molecular entre as partículas, conhecidas como Forças de Van der Waals, são causadas pela interação de partículas dipolares permanentes ou induzidas, enquanto as forças de repulsão ocorrem devido ao Potencial Zeta (SCHOENHALS, 2006).

Os colóides presentes em águas, geralmente possuem carga elétrica negativa que atrai íons de carga positiva, formando uma capa de íons aderidos em torno da superfície do colóide e circundada por uma camada externa difusa, mantendo-se próxima à superfície da partícula pelas forças eletrostáticas. As partículas coloidais mantêm-se em suspensão devido à repulsão entre si, causada pelos íons de mesma carga (RICHTER, 1991).

Dentro deste enfoque, De Julio et al. (2006) empregaram reagente de Fenton como agente coagulante no tratamento de água com cor verdadeira elevada ($100 \pm 5\ \text{uH}$) causada pela introdução de substâncias húmicas extraídas de turfa, seguida da flotação por ar dissolvido. Otimizou-se o par de valores dosagem de coagulante x pH de coagulação para posterior construção dos diagramas de coagulação, obtendo-se eficiências de remoção de cor aparente pouco superiores a 60%. Procurou-se simular um tratamento em ciclo completo, realizando-se ensaio de filtração em areia após flotação, obtendo-se efluente de excelente qualidade, apresentando cor aparente, turbidez e absorbância a $253,7\ \text{nm}$ remanescentes menores ou iguais a $2\ \text{uH}$, $0,40\ \text{uT}$ e $0,009\ \text{cm}^{-1}$, respectivamente, e ferro total residual $< 0,005\ \text{mg.L}^{-1}$ e COD $< 0,001\ \text{g.L}^{-1}$.

3.3.1.2 Geração de bolhas em sistemas de flotação

Sabe-se que os sistemas de flotação demandam a existência de bolhas de ar para flotar as partículas suspensas a serem removidas.

De acordo com Reay e Ratcliff (1973), a formação de bolhas de ar na flotação por ar disperso ocorre pela passagem forçada de ar através de placas porosas; já na flotação por ar dissolvido para geração das bolhas, uma parte do efluente clarificado é reciclado, comprimido entre 4 e 5 atm e saturado com ar, passando em seguida por uma válvula de despressurização na qual ocorre a formação das bolhas de ar.

Quando ocorre uma queda repentina de pressão no bocal ou válvula, bolhas são provavelmente formadas devido à cavitação. Cavitação é a produção de bolhas devido à queda de pressão, seguida por implosão e explosão da bolha em pequenas bolhas. A cavitação resulta da queda de pressão na abertura estreita de um bocal ou válvula. Em relação ao tamanho de bolha é importante que as bolhas de ar produzidas sejam pequenas ($<100\text{-}120\text{ }\mu\text{m}$) devido aos seguintes motivos (RIJK et al., 1994):

- Com pequenas bolhas de ar menor ângulo de contato é formado, em comparação a grandes bolhas, entre estas e as partículas a serem removidas (Hanisch¹, 1959, citado por RIJK et al., 1994), o que facilita a interação partícula-bolha.
- Bolhas de ar de pequeno tamanho são incluídas dentro do floco (aglomerado de partículas) mais facilmente.
- A possibilidade de colisão e adesão entre bolhas e partículas aumenta mais em função do número de bolhas do que em função do tamanho da bolha (FLINT; HOWARTH, 1971; REAY; RATCLIFF, 1973). Desta forma, para mesma quantidade de ar, as bolhas formadas devem ser tão pequenas quanto possível, com objetivo de aumentar a concentração de bolhas e conseqüentemente a eficiência da flotação.
- Bolhas pequenas têm velocidade de subida menor do que bolhas grandes, desta forma o tempo de residência de bolhas de menor tamanho na unidade de flotação é maior, o que aumenta a possibilidade de colisão entre bolhas e flocos.

¹ HANISCH, B. The scientific application of flotation with very small air bubbles for purification of sewage water. *Stuttgart University of Technology* (in German), 1959.

- Devido a alta velocidade de subida de bolhas grandes (≥ 2 mm), as forças cisalhantes no aglomerado bolha-floco que está subindo em direção a superfície são tão fortes que podem causar quebra dos flocos (Jedele¹, 1984, citado por RIJK et al., 1994).

Outro fator importante é como acontece o crescimento das bolhas de ar em sistemas de flotação. Alguns dos fatores que podem gerar o aumento do tamanho das bolhas de ar são elencados por Rijk et al. (1994) e são citados a seguir:

- Assimilação de ar do escoamento principal. Neste caso como parte da água residuária permanece supersaturada pode haver transferência de ar desta para as bolhas de ar.
- Diminuição da pressão hidrostática.
- Coalescência que é o fenômeno de união das bolhas de ar. Na prática é mais provável que a coalescência ocorra na zona turbulenta, próximo a válvula, e que seja negligenciável no tanque de flotação, porque o conteúdo total de ar no tanque é baixo e porque as bolhas seguem um fluxo e portanto não podem colidir. A possibilidade de coalescência pode ser reduzida pela adição de químicos que diminuem a tensão superficial (Hanisch, 1959, citado por RIJK et al., 1994).

Devido a importância das bolhas de ar para realização da flotação, existem diversos estudos sendo realizados com diferentes enfoques, dentre os quais encontra-se: determinação do tamanho de bolhas e relação com adensamento de lodo (RIJK et al., 1994); efeito do tamanho das bolhas na adsorção de espumantes e coletores em flotação (NGUYEN(b) et al., 2006), entre outros.

3.3.1.3 Tamanho das partículas e flotabilidade

A natureza e estrutura das partículas determina que tipos de adesão são possíveis e, no caso de adsorção, qual o tamanho máximo de bolha para o qual a

¹ JEDELE, K. Application of dissolved-air flotation for segregation of the activated sludge from the water. *Stutt. Ber. Siedlungswass. wirtsch.* v. 84 (in German), 1984.

adesão é possível (Hanisch, 1959, citado por RIJK et al., 1994). A eficiência da colisão é proporcional ao quadrado do tamanho da partícula (REAY; RATCLIFF, 1973). Além disso, a firmeza dos flocos é também importante porque as forças cisalhantes que são exercidas durante a subida do aglomerado bolha-floco pode causar quebra do floco (Jedele, 1984, citado por RIJK et al., 1994).

3.3.1.4 Adesão partícula-bolha

A colisão de uma bolha com uma partícula, induzida pela turbulência do fluido, é o mecanismo pelo qual o contato partícula-bolha pode ser realizado. De acordo com Avelino (1997) o processo de captura das partículas pelas bolhas na zona de coleta pode ocorrer através de dois mecanismos:

- Colisão entre partícula e bolha seguida da adsorção devido à natureza hidrofóbica das partículas;
- Arraste de partículas que ficam entre as bolhas, devido ao movimento das bolhas em direção ao topo da coluna de flotação.

Neste sentido, Rijk et al. (1994) apontam que dois mecanismos são possíveis para adesão entre a bolha de ar e o floco:

- Inclusão das bolhas de ar dentro dos flocos de lodo. As forças de adesão não são importantes neste caso, porque as bolhas são incluídas na estrutura dos flocos. A ocorrência deste mecanismo aumentará se os flocos forem maiores que as bolhas e tiverem forma mais irregular.
- Adsorção das bolhas no exterior dos flocos. A adesão pode ser feita porque o floco serve como núcleo para a produção de bolha ou por interação entre a bolha e floco.

De acordo com Rubio et al. (2002), uma característica importante relacionada a DAF, diz respeito a outros mecanismos de interação bolhas/partículas além da adesão através das forças hidrofóbicas, conforme é possível observar na Figura 3.1. Desta maneira, além da colisão e adesão

partículas/bolhas parte do ar dissolvido na água, que não é convertido em bolhas ao passar pela válvula, permanece em solução e forma bolhas na superfície das partículas, que servem como um núcleo (Solari; Gochin¹, 1992, citados por RUBIO et al., 2002). Este mecanismo é independente da hidrofobicidade da superfície permitindo flotação de partículas hidrofílicas. Além disso, o aprisionamento de bolhas entre os flocos ou coágulos e a captura dos sólidos pelas bolhas de ar que estão ascendendo são mecanismos que facilitam a operação de separação.

Percebe-se então, que a interação entre bolhas de ar e partículas sólidas, ocorre através de diferentes mecanismos fazendo com que a flotação seja um método versátil para separação de sólidos.

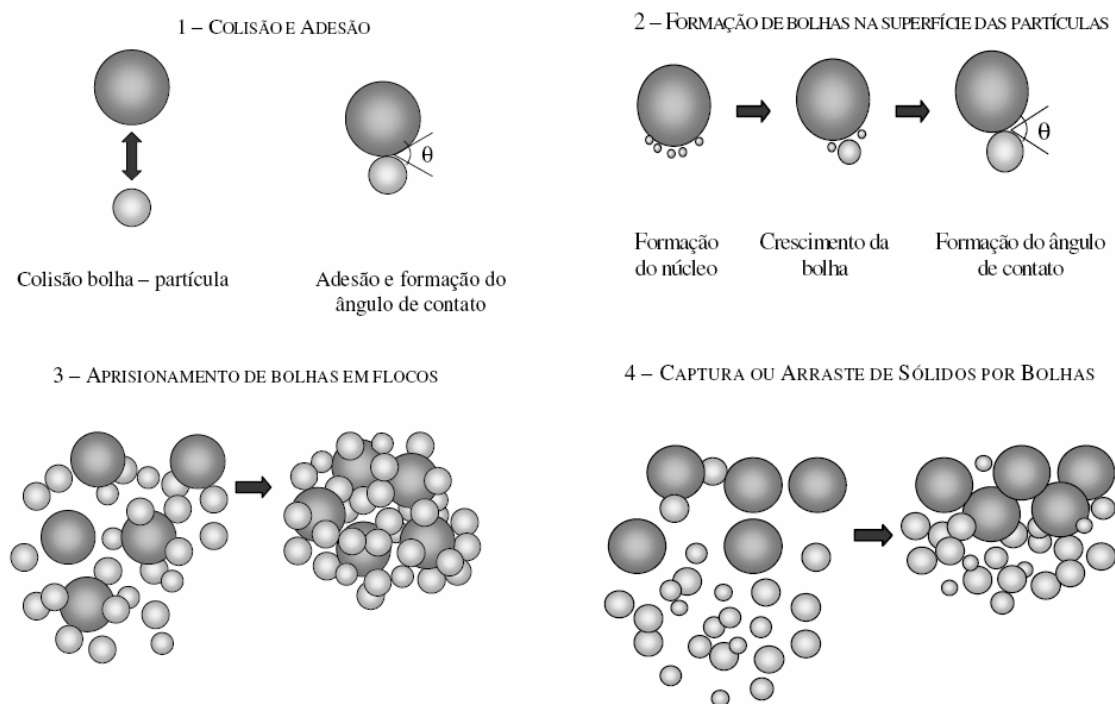


Figura 3.1 – Fenômenos de colisão e adesão (1), nucleação (2), aprisionamento de bolhas em flocos (3) e captura de partículas e agregados por microbolhas (4).

Fonte: RUBIO et al. (2002).

¹ Solari, J. A., Gochin, R. J., 1992. Fundamental aspects of microbubbles flotation. In: Ralston, J., Laskowski, J. S. (Eds.), *Colloid Chemistry in Mineral Processing*, vol. 12, Elsevier, Amsterdam, pp. 395-418.

Rijk et al. (1994) afirmam que a formação de um agregado estável entre bolhas e flocos vai depender, entre outros fatores, do tamanho das bolhas e do tamanho e da natureza dos flocos. Porém, a adesão entre bolhas e flocos pode ser induzida pela utilização de aditivos químicos que agem como coletores (Hanisch, 1959; citado por RIJK et al., 1994). Um coletor é uma molécula longa com uma parte hidrofílica (ativa quimicamente) e uma parte hidrofóbica (não-ativa quimicamente). A parte hidrofílica se volta para a fase sólida e a parte hidrofóbica para a fase líquida. Desta forma a partícula se torna hidrofóbica, interagindo mais facilmente com as bolhas de ar, o que facilita a separação dos sólidos por flotação.

3.3.2 Aplicação da flotação ao tratamento de águas residuárias

As pesquisas realizadas sobre sistemas de flotação, abrangem várias aplicações. A seguir são descritas de maneira sucinta, algumas pesquisas realizadas no Brasil e no mundo, enfocando principalmente a área de tratamento de águas residuárias.

Com o enrigecimento das políticas ambientais, o tratamento de efluentes de indústrias químicas, de alimentos, de corantes e o tratamento de esgotos estão se tornando área de aplicação cada vez mais freqüente da flotação. Prova disto é o uso da flotação no denominado “Sistema de flotação e remoção de flutuantes para a melhoria das águas do rio Pinheiros na região metropolitana de São Paulo” como solução complementar às ações de ampliação e implantação dos sistemas de coleta e tratamento de esgoto, que vêm sendo implementados pelo Governo do Estado na Região Metropolitana de São Paulo. Neste projeto, o sistema de flotação vem sendo testado através de estação piloto que trata a água utilizada para irrigação no Projeto Pomar, programa de recuperação da vegetação das margens do Rio Pinheiros, desenvolvido pela Secretaria Estadual do Meio

Ambiente em parceria com diversas empresas da iniciativa privada (SECRETARIA, 2008).

As primeiras aplicações do processo na recuperação de corpos d'água ocorreram em 1998 em dois canais de drenagem, no município do Guarujá, com o objetivo de reduzir a emissão de esgoto e melhorar as condições de balneabilidade da Praia da Enseada. O sistema também vem sendo utilizado, com sucesso, na despoluição dos lagos dos parques do Ibirapuera, Aclimação e está sendo implantado nos lagos dos parques estaduais do Jaraguá e do Horto Florestal (SECRETARIA, 2008).

Zouboulis et al. (1992), estudaram a aplicação de várias técnicas de flotação, incluindo a flotação iônica, de precipitados e de colóides no tratamento de águas residuárias. Devido aos resultados positivos obtidos, estes pesquisadores apontam essas técnicas como sendo adequadas a essa área de atuação.

Conforme Tessele et al. (2004), a flotação pode ser utilizada como uma operação unitária, como pré-tratamento, associada a outros tratamentos como adsorção, tratamento biológico, desinfecção, oxidação e como uma tecnologia para polimento final. A otimização das técnicas de flotação aplicadas ao tratamento de efluentes envolve o conhecimento dos fenômenos físico-químicos interfaciais, bem como os mecanismos envolvidos na geração de bolhas e nas etapas de condicionamento e separação. Além desses fatores, a eficiência dos micro-processos envolvidos na flotação é influenciada pela forma e distribuição do tamanho de bolhas.

De acordo com Rodrigues e Rubio (2007) a flotação é aplicada a mais de um século no beneficiamento de minérios e suas aplicações ambientais são mais conhecidas na engenharia civil (sanitária), química e de alimentos. Segundo o referido autor, a FAD é considerada como uma das mais importantes ferramentas para remover partículas leves, suspensões coloidais, precipitados ou dispersões finas.

Ainda em relação a aplicação ambiental da flotação, pode-se dizer que esta operação tem como objetivo separar partículas sólidas ou líquidas (gotículas) presentes em dispersões sólido/líquido (suspensões) e emulsões líquido (gotículas de óleo)/ líquido (água). Além da separação de fibras e sólidos de baixa densidade (RAMALHO, 1983).

De acordo com Rubio et al. (2002) o uso da flotação no tratamento de águas residuárias vem aumentando crescentemente, especialmente na mineração e na indústria metalúrgica. Segundo os referidos autores este processo será incorporado como uma tecnologia na indústria de minerais para tratar águas residuárias e, quando possível, para reciclar água e materiais de processos.

Schneider et al. (1994) desenvolveram um trabalho para recuperação de proteínas suspensas no efluente de uma planta de produção de proteína de soja. O trabalho contemplou estudo da caracterização do efluente, desestabilização da suspensão de proteína, FAD e sedimentação. Os testes de sedimentação e flotação foram desenvolvidos em bancada e em escala contínua da planta industrial real. A desestabilização e agregação das proteínas em flocos firmes foram alcançadas por adição de 200-300 mg.L⁻¹ de FeCl₃, acerto do pH no ponto isoelétrico das proteínas (pH = 4,5) e adição de 2-3 mg.L⁻¹ de um polímero aniônico de poliacrilamida de alto peso molecular. Os testes de bancada indicaram que, sob estas condições, pode ser feita separação sólido-líquido por ambos os processos, FAD e sedimentação, com o primeiro fornecendo melhores resultados. Porém, nos testes na planta industrial, a sedimentação apresentou melhores eficiências de separação. Na planta industrial o FAD apresentou bom desempenho apenas quando os flocos eram suficientemente hidrofóbicos e resistentes à desagregação mecânica, o que não ocorreu sempre. A sedimentação foi menos sensível a variações na alimentação.

Avelino (1997) pesquisou a recuperação de proteínas em solução, na qual utilizou flotação contínua em coluna para separar os precipitados hidrofóbicos da solução após a precipitação das mesmas, usando polieletrólitos e polímeros não-

iônicos e conduziu testes sobre a hidrofobicidade e flotabilidade desses precipitados. Os resultados mostraram ser de fundamental importância o uso de agentes precipitantes hidrofóbicos para que o precipitado formado pudesse ser separado por flotação.

Zouboulis e Avranas (2000) desenvolveram um estudo no qual o tratamento de emulsões contendo *n*-octano (usadas como água residuária simulada) foi investigado por meio de flotação por ar dissolvido em “*jar-tests*”. O efeito dos seguintes parâmetros na eficiência da flotação para separação do óleo emulsificado foi examinado: (a) presença do surfactante não iônico *Tween* 80, usado para estabilização das emulsões, (b) valor inicial do pH das emulsões, (c) concentração dos aditivos químicos, tais como polieletrólitos (floculantes orgânicos: catiônico ou aniônico) ou cloreto férrico (coagulante inorgânico), (d) concentração do oleato de sódio (usado como um coletor na flotação) e (e) taxa de reciclo. Foram realizadas medidas do potencial-zeta para interpretar os resultados obtidos. O uso dos polieletrólitos não foi capaz de tratar efetivamente as emulsões estudadas, enquanto que a adição de cloreto férrico e subsequente aplicação de flotação por ar dissolvido foi muito eficiente. Nas condições ótimas definidas experimentalmente (taxa de reciclo: 30%, pH: 6, $[\text{Fe}^{3+}]$: 100 mg.L⁻¹ e [oleato de sódio]: 50 mg.L⁻¹) mais de 95% do óleo emulsificado foi efetivamente separado de uma concentração inicial de 500 mg.L⁻¹.

Al-Shamrani *et al.* (2002) investigaram o papel dos sulfatos de alumínio e férrico como agentes desestabilizantes para emulsões água-óleo estabilizadas por um surfactante não-iônico (*Span* 20) em termos de remoção de óleo. Os efeitos da dose de coagulante, pH, duração e intensidade de mistura lenta e rápida foram considerados. Medidas eletrocinéticas indicaram que as gotas de óleo têm um potencial zeta negativo fracamente dependente do pH. Os coagulantes escolhidos foram efetivos na redução do potencial zeta das gotas de óleo, e a inversão da carga foi observada para o sulfato de alumínio. Remoções de óleo acima de 99,3% a pH 8 e 99,94% a pH 7 foram encontradas para sulfato de alumínio e férrico, respectivamente. Tempos de mistura rápida de aproximadamente 120s e

tempos de floculação na faixa de 15 a 20min apresentaram-se ótimos para a separação no FAD. Concluiu-se que velocidades médias de mistura relativamente baixas, para coagulação e floculação, são essenciais para uma operação mais eficiente.

Jokela et al. (2001) fizeram um estudo, no qual equipamentos pilotos de flotação por ar dissolvido foram utilizados para tratamento de águas residuárias de aquicultura, que contém sólidos oriundos das fezes e alimentação dos peixes. Dependendo da qualidade do efluente foram obtidas reduções de 70 a 90% de fósforo sem o uso de aditivos químicos. Já a precipitação química, seguida de flotação, apresentou 90% de redução de fósforo e concentrações no efluente de $0,05 \text{ mg.L}^{-1}$ para uma carga hidráulica de $13 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$.

Edzwald (1993) estudou a remoção de algas de águas de abastecimento. O referido autor identificou a necessidade do uso de coagulação como pré-tratamento para a flotação. A eficiência da flotação foi examinada em termos de produtos adimensionais e comparada ao processo de sedimentação. O FAD produziu água mais clarificada com menor turbidez e conteúdo de algas.

Em um estudo, investigou-se o desempenho de plantas de flotação por ar dissolvido, em escala de laboratório para tratamento de água residuária de abatedouro, para pressões do tanque de saturação de 100 a 500 kPa, concentrações de sólidos suspensos na água residuária de 170 a 2100 mg.L^{-1} e taxas ar/sólidos de 0 a 0,17. Foram alcançadas eficiências máximas de remoção para demanda química de oxigênio, sólidos suspensos e gordura de 70, 50 e 95% respectivamente, para altos conteúdos de sólidos suspensos na água residuária e altas taxas ar/sólidos. A pressão no tanque de saturação não influenciou significativamente o tamanho das bolhas geradas no processo, ou as eficiências de remoção. Altas taxas ar/sólidos foram necessárias para obter eficiências de remoção máximas e para prevenir sedimentação dos sólidos suspensos (LOVETT; TRAVERS, 1986).

Uma pesquisa para melhorar a flotação como espessante de lodo ativado foi conduzida, sendo os experimentos focados no tamanho e concentração das bolhas de ar produzidas, parâmetros importantes no processo de flotação. Experimentos de laboratório mostraram que o tamanho da bolha aumentou de 50 para 100µm quando um tubo foi colocado depois da válvula de redução de pressão. Estes resultados indicaram a necessidade de comprovar a formação de bolha no espessador em escala real. Contudo, os efeitos negativos que ocorreram no laboratório não foram encontrados nos experimentos em escala real, o que resultou em tamanhos de bolha de 45-60 µm (RIJK et al., 1994).

Em um estudo recente foi utilizado um sistema FAD-UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), ou reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo, para tratamento de água residuária de abatedouros, no qual foi avaliado o desempenho de um UASB para tratamento de água residuária de abatedouro, com e sem flotação por ar dissolvido como pré-tratamento. Além disso, a operação do UASB a $30 \pm 1^{\circ}\text{C}$ com resíduo pré-tratado, mostrou-se tecnicamente viável (MANJUNATH et al., 2000). Percebe-se que a flotação pode ser bastante útil para separação de partículas de difícil sedimentação, que poderiam prejudicar o desempenho do tratamento biológico.

Blöcher et al. (2003) desenvolveram um novo processo híbrido de flotação e separação por membrana, constituído de módulos de microfiltração submersos diretamente dentro de um tanque de flotação, para o estágio de separação de metais pesados. A viabilidade deste processo foi alcançada usando zeólitas sintéticas em pó como agentes ligantes para capturar os metais. O processo foi aplicado em escala de laboratório para tratar água residuária da indústria eletrônica. Os metais tóxicos em questão, cobre, níquel e zinco, foram reduzidos de concentrações iniciais de 474; 3,3 e 167 mg.L⁻¹, respectivamente, para concentrações abaixo de 0,05 mg.L⁻¹.

Minhalma e Pinho (2001) propuseram um processo integrado de floculação/flotação/ultrafiltração para tratamento de águas residuárias do

processamento de cortiça. No estudo de floculação, os resultados mostraram aumento no potencial- ξ (zeta) com a adição da quitosana e aumento significativo do tamanho da partícula com o abaixamento do pH. Já no estudo da flotação por ar dissolvido utilizando a água residuária floculada, no qual os parâmetros variados foram pressão no tanque de saturação e taxa de reciclo, foi observado que para altas pressões, e para uma taxa de reciclo de 0,19, a remoção dos polifenóis foi mais alta. O pré-tratamento com floculação/flotação levou a um aumento do fluxo permeado na ultrafiltração.

Chung et al. (2000) conduziram um trabalho para demonstrar a possibilidade de ampliação de escala de um sistema de flotação por ar dissolvido do tipo “*sand-float*”, de uma escala piloto de $72 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ para uma escala real de $6000 \text{ m}^3/\text{dia}$. Para otimizar o FAD, foi necessário determinar a taxa de aplicação superficial e a pressão do tubo de ar dissolvido. As condições ótimas encontradas a partir da planta piloto foram, respectivamente, $7,5 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e 440 kPa. As eficiências de remoção de carbono orgânico total (TOC) da planta em escala real foram tão satisfatórias quanto da escala piloto, para as mesmas taxas de aplicação superficial. Contudo, a planta em escala real apresentou desempenho um pouco inferior em relação a planta em escala piloto na redução de turbidez, a planta em escala real tinha longo tempo de detenção e condições de mistura turbulenta durante o período de retrolavagem, que pode ser responsável pela quebra de flocos frágeis. O processo FAD mostrou-se mais eficiente do que os sistemas convencionais de sedimentação.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 DESCRIÇÃO DO FLOTADOR

A montagem de parte do equipamento, incluindo o tanque de flotação, em chapa galvanizada e revestido com tinta epóxi, a tubulação em aço inox, o Venturi modificado e a base de sustentação do flotador, foi feita pela empresa ESMAF Ltda. A Figura 4.1 representa o esquema simplificado do flotador utilizado nos experimentos em sistema descontínuo. O tanque de flotação possui capacidade total de 200L. O equipamento foi instalado na planta de processamento do Departamento de Engenharia de Alimentos (DEA) da Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

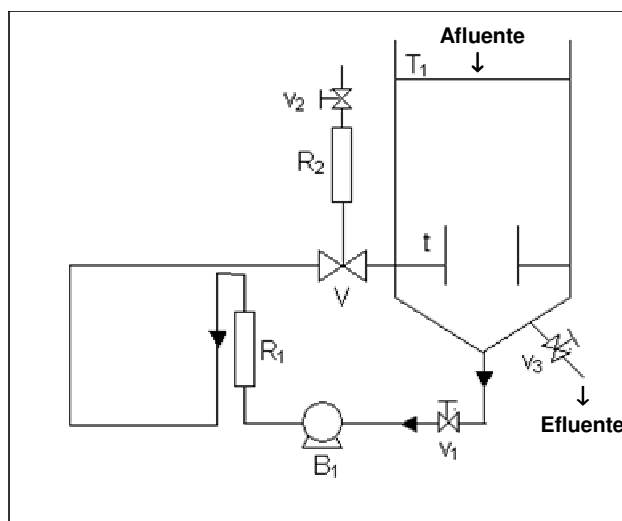


Figura 4.1 – Esquema simplificado do flotador usado nos experimentos conduzidos em sistema descontínuo.

T₁ – tanque de flotação, B₁ – bomba centrífuga, R₁ – rotômetro para registro da vazão de reciclo de água residuária, R₂ – rotômetro para registro da vazão de entrada de ar, t – tubo de mistura, V – Venturi modificado, v₁ – válvula para controle da vazão de reciclo de água residuária, v₂ – válvula para controle da entrada de ar, v₃ – válvula para coleta da água residuária tratada.

A Figura 4.2 representa o esquema do flotador utilizado nos experimentos conduzidos em sistema contínuo.

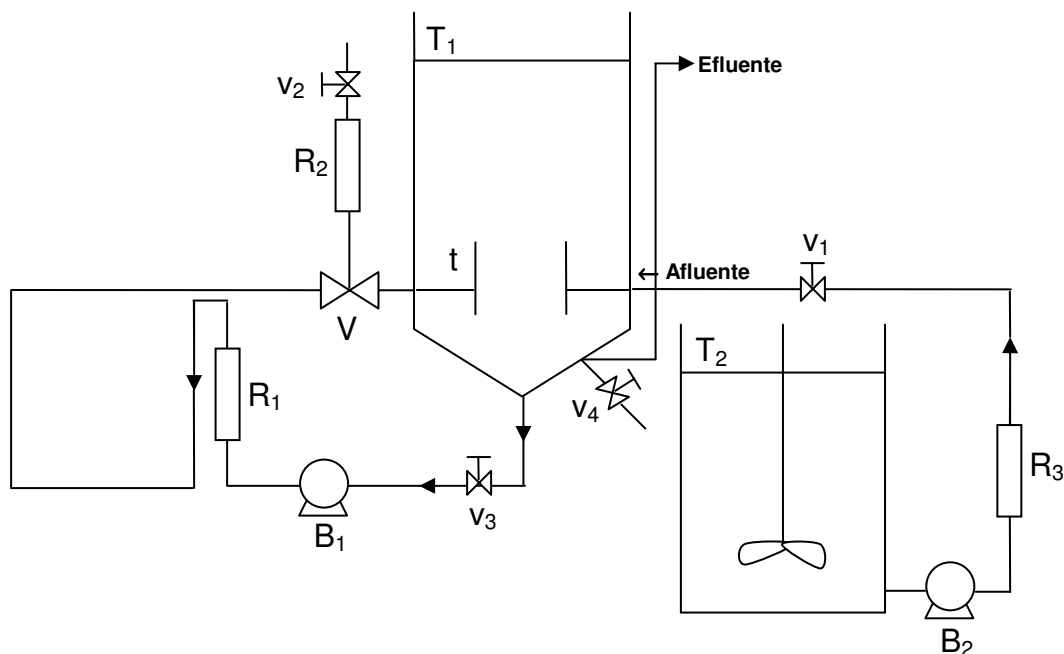


Figura 4.2 – Esquema simplificado do flotador utilizado para os experimentos conduzidos em sistema contínuo.

T₁ – tanque de flotação, T₂ – tanque de preparo/armazenamento de água residuária, B₁ – bomba centrífuga para reciclo da água residuária, B₂ – bomba centrífuga de alimentação do flotador, R₁ – rotâmetro para registro da vazão de reciclo da água residuária, R₂ – rotâmetro para registro da vazão de ar aspirado pelo venturi, R₃ – rotâmetro para registro da vazão de alimentação do flotador, t – tubo de mistura, V – Venturi modificado, v₁ – válvula de alimentação de água residuária, v₂ – válvula para controle da entrada de ar, v₃ – válvula para controle da vazão de reciclo de água residuária, v₄ – válvula de descarte do efluente.

A Figura 4.3 representa o Venturi modificado, construído em latão, em corte longitudinal com a pedra porosa inserida em sua garganta, acessório utilizado para formação das bolhas de ar utilizadas durante o processo de flotação propriamente dito.

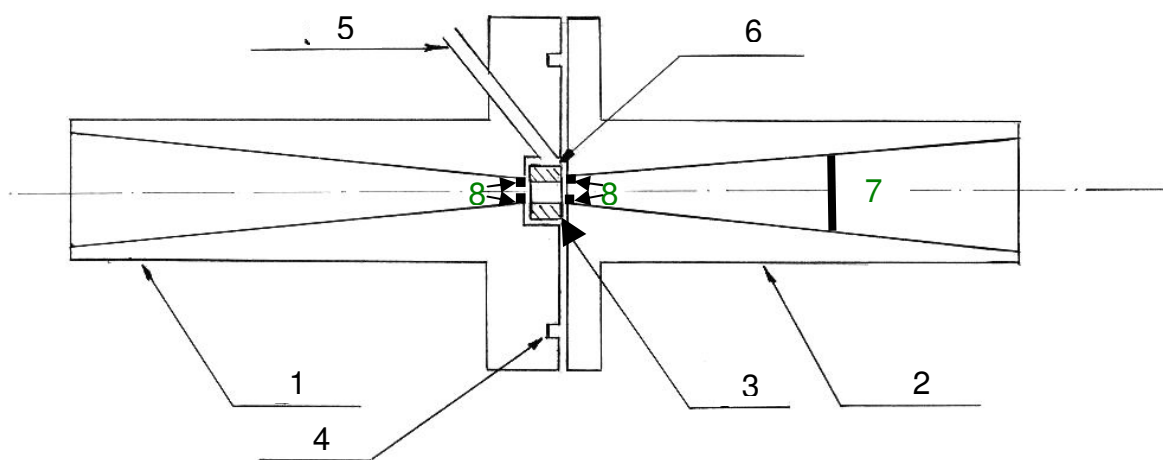


Figura 4.3 – Representação do Venturi modificado, em corte longitudinal.

1,2 – Partes cônicas do Venturi; 3 – Pedra porosa furada em corte; 4 – Ranhura para inserção de anel de borracha; 5 – Tubo para sucção de ar; 6 – Câmara de ar envolvendo a pedra porosa; 7 – Barreira vertical utilizada no Venturi 1; 8 – Degraus eliminados para obtenção do Venturi 3.

Durante a realização dos experimentos, foram feitas algumas alterações no Venturi, objetivando melhorar a formação de pequenas bolhas de ar e conseqüentemente a eficiência do flotador na separação de sólidos da água residuária estudada.

O primeiro Venturi (V1) estudado possuía uma barreira vertical na metade do cone de saída, indicada pelo número 7 na Figura 4.3.

O segundo Venturi (V2) estudado foi obtido a partir da retirada da barreira vertical do cone de saída, indicada pelo número 7 na Figura 4.3.

O terceiro Venturi (V3) estudado foi obtido a partir da redução do degrau existente próximo a garganta do Venturi, indicado pelo número 8 na Figura 4.3.

Já o quarto Venturi (V4) estudado foi obtido a partir da retirada da pedra porosa do interior da garganta do Venturi, indicada pelo número 3 na Figura 4.3.

4.2 ÁGUA RESIDUÁRIA UTILIZADA NA PESQUISA

Nesta pesquisa foi utilizada água residuária sintética, cuja fração de sólidos suspensos é composta de proteínas do leite precipitadas juntamente com a gordura que é incorporada neste processo. Para tanto, leite em pó Itambé, cuja composição encontra-se na Tabela 4.1, foi dissolvido em água de torneira em concentração pré-estabelecida de 0,1%*m/v*, sendo o pH da solução ajustado em aproximadamente 4,6. Neste valor de pH o ponto isoelétrico das proteínas do leite é alcançado, ocorrendo precipitação das mesmas.

Tabela 4.1 – Composição do leite em pó integral Itambé.

Composição média por cada 26g (g)	%
Carboidratos	9,6 36,9
Proteínas	6,7 25,8
Gorduras Totais	7,1 27,3
Cinzas e umidade	2,6 10,0

Fonte: Embalagem do leite utilizado.

4.3 OPERAÇÃO DO FLOTADOR EM SISTEMA DESCONTÍNUO

Para estes ensaios foi utilizado o flotador esquematizado na Figura 4.1. O tanque de flotação foi preenchido com um volume de aproximadamente 100L de água residuária. O início do ensaio se deu com a circulação da água residuária pelo Venturi modificado, permitindo a formação das bolhas de ar, com auxílio da bomba centrífuga. O controle da vazão de água residuária foi feito manualmente por uma válvula tipo globo, e as medidas de vazão de líquido (Q_L) e de ar (Q_{ar}) foram feitas pela utilização de rotâmetros da marca Omel.

Os tempos de coleta de amostra foram 15, 30, 45 e 60 minutos a partir do início do funcionamento do equipamento.

As vazões de reciclo de água residuária, Q_L em $L.h^{-1}$, utilizadas foram as seguintes:

Ensaios com os tubos Venturi 1, 2 – 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000.

Ensaios com o Venturi 3 – 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500.

Ensaios com o Venturi 4 – 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000.

Vale ressaltar que para os ensaios com os tubos Venturi 1 e 2 foi utilizado um rotâmetro que permitia registro de vazões máximas de $1000 L.h^{-1}$, já para os tubos Venturi 3 e 4 foi utilizado outro rotâmetro que permitia registro de vazões de até $2000 L.h^{-1}$. Entretanto nos ensaios realizados com o Venturi 3 o máximo valor de Q_L alcançado foi $1500 L.h^{-1}$, devido a sua configuração.

4.4 OPERAÇÃO DO FLOTADOR EM SISTEMA CONTÍNUO

A Figura 4.2 apresenta o esquema do flotador utilizado nos ensaios em sistema contínuo. O preparo da água residuária foi feito no tanque indicado por T_2 , com capacidade máxima de 2000 L. A alimentação do tanque de flotação se dava com o auxílio da bomba B_2 , sendo que a vazão de alimentação era controlada pela válvula v_1 e registrada pelo rotâmetro R_3 . Ao mesmo tempo em que o tanque era alimentado, ocorria recirculação da água residuária pelo Venturi modificado auxiliada pela bomba centrífuga B_1 , proporcionando a formação das bolhas de ar.

O controle das vazões e registro das mesmas era feito através de válvulas e rotâmetros conforme indicado na Figura 4.2.

As amostras foram coletadas em intervalos de 15 minutos.

4.4.1 Distribuição de tempo de residência (DTR)

Os testes de distribuição de tempo de residência (DTR) foram realizados, com objetivo de determinar o tempo necessário para o equipamento entrar em estado estacionário, nas seguintes condições:

Vazões de reciclo de água residuária (Q_L) de 700 e 1000 L.h⁻¹ pelo fato destas vazões terem apresentado bons resultados de eficiência de separação de sólidos para o flotador operando em sistema descontínuo e utilizando o Venturi 3 para formação das bolhas de ar.

Tempos de residência de 15 e 60 min pelo fato de corresponderem ao mínimo e máximo utilizados no flotador operando em sistema descontínuo.

Foram feitas algumas combinações de condições para realização dos testes com objetivo de abranger os extremos das condições que seriam estudadas:

- a) Mínimo tempo de residência e mínima vazão de reciclo de água residuária: $t = 15\text{min}$, $Q_{al} = 400 \text{ L.h}^{-1}$, $Q_L = 700 \text{ L.h}^{-1}$;
- b) Mínimo tempo de residência e máxima vazão de reciclo de água residuária: $t = 15\text{min}$, $Q_{al} = 400 \text{ L.h}^{-1}$, $Q_L = 1000 \text{ L.h}^{-1}$;
- c) Máximo tempo de residência e mínima vazão de reciclo de água residuária: $t = 60\text{min}$, $Q_{al} = 100 \text{ L.h}^{-1}$, $Q_L = 700 \text{ L.h}^{-1}$;
- d) Máximo tempo de residência e máxima vazão de reciclo de água residuária: $t = 60\text{min}$, $Q_{al} = 100 \text{ L.h}^{-1}$, $Q_L = 1000 \text{ L.h}^{-1}$.

4.4.2 Experimentos realizados com o Venturi 3

Os ensaios foram realizados nas condições de tempo de detenção, vazão de alimentação (Q_{al}) e vazão de reciclo de água residuária (Q_L) apresentadas no Quadro 4.1 a seguir.

Quadro 4.1 – Condições de operação dos ensaios em sistema contínuo com o Venturi 3.

t (min)	15 ($Q_{al} = 400 \text{ L.h}^{-1}$)		30 ($Q_{al} = 200 \text{ L.h}^{-1}$)		60 ($Q_{al} = 100 \text{ L.h}^{-1}$)	
$Q_L \text{ (L.h}^{-1}\text{)}$	800	1100	800	1100	800	1100

Foram selecionadas as vazões de reciclo de água residuária (Q_L) apresentadas acima, pelo fato de terem apresentado os melhores resultados quando da realização dos experimentos em sistema descontínuo.

4.4.3 Experimentos realizados com o Venturi 4

Os ensaios foram realizados nas condições de tempo de detenção, vazão de alimentação (Q_{al}) e vazão de reciclo de água residuária (Q_L) apresentadas no Quadro 4.2 a seguir.

Quadro 4.2 – Condições de operação dos ensaios em sistema contínuo com o Venturi 4.

t (min)	15 ($Q_{al} = 400 \text{ L.h}^{-1}$)		30 ($Q_{al} = 200 \text{ L.h}^{-1}$)		60 ($Q_{al} = 100 \text{ L.h}^{-1}$)	
$Q_L \text{ (L.h}^{-1}\text{)}$	800	1900	800	1900	800	1900

A vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 800 L.h^{-1} foi escolhida pelo fato de ter apresentado melhores resultados quando da realização dos experimentos em sistema descontínuo. Já Q_L de 1900 L.h^{-1} foi selecionada pelo fato de ter sido a máxima vazão de reciclo de água residuária alcançada sem a utilização da pedra porosa no Venturi.

4.5 DETERMINAÇÃO DA TENSÃO SUPERFICIAL

A determinação da tensão superficial da suspensão foi feita através do Método das gotas, baseado na lei de Tate, segundo a qual é possível determinar a tensão superficial de um líquido desconhecido por comparação com a tensão superficial de um líquido conhecido (GONÇALVES, 1968).

O líquido de tensão superficial conhecida utilizado como referência foi a água. Foi feita a contagem das gotas, em triplicata, para água e para cada amostra de água residuária, bruta e após a flotação, em intervalos de tempo de 15, 30, 45 e 60 minutos.

A tensão superficial da água a 20°C é 72,8 dina.cm⁻¹ ou 72,8 x 10⁻³ N.m⁻¹ (PERRY, 1984).

4.6 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS

Para avaliação da eficiência do flotador foi determinada a concentração de leite: no afluente e no efluente do flotador, para os experimentos conduzidos de modo contínuo; no início e no final da operação do equipamento, para os experimentos conduzidos de modo descontínuo, considerando os tempos de detenção hidráulico e de flotação em cada situação. Para tanto foi verificada a absorbância das amostras através de espectrofotômetro (DR/4000U Hach) a 600nm e feita comparação com dados da curva padrão elaborada através da leitura de absorbância de soluções de concentrações conhecidas de leite em pó, conforme é possível observar na Figura 4.4 a seguir.

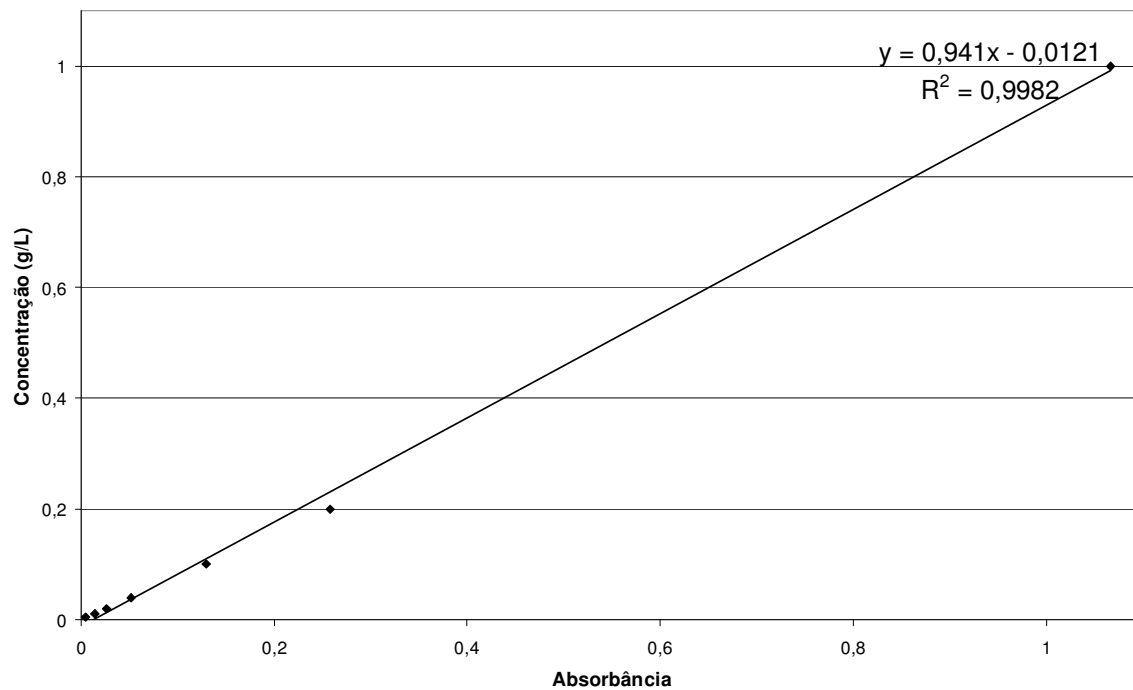


Figura 4.4 – Curva padrão de concentração de leite em função da absorbância.

4.7 EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS

Para o cálculo da eficiência de separação (E) foi considerada a concentração de leite no afluente e no efluente do flotador (sistema contínuo) e no início e ao final do tempo de reciclo considerado (sistema descontínuo). A Equação 4.1 mostra como foi obtida esta eficiência:

$$E(\%) = \left(\frac{C_o - C}{C_o} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

onde C_o e C são as concentrações de leite no início e no final do tratamento, respectivamente, para o caso dos ensaios em sistema descontínuo, e no afluente e efluente do flotador para o caso dos ensaios em sistema contínuo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 EXPERIMENTOS CONDUZIDOS EM SISTEMA DESCONTÍNUO

Objetivando determinar a eficiência de separação de sólidos no flotador, foram avaliadas as influências da vazão de reciclo (Q_L), de ar (Q_{ar}) e tempo de reciclo de água residuária no tratamento da água residuária sintética preparada conforme descrito anteriormente no item 4.2.

Para cada vazão de reciclo (Q_L) foi calculada a eficiência de separação de sólidos (%), conforme a equação 4.1.

Os resultados obtidos são apresentados para cada modificação feita no Venturi, conforme descrito na metodologia ao final do item 4.1.

5.1.1 Experimentos conduzidos com o primeiro Venturi (V1)

Na Figura 5.1 observa-se que inicialmente houve aumento da vazão de ar (Q_{ar}) com o aumento da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) que passava pelo Venturi e que para vazões maiores que 600 L.h^{-1} de água residuária houve tendência a diminuição da vazão de ar, o que não era esperado inicialmente, pois imaginava-se que a vazão de ar continuaria aumentando. Sabe-se que o ar é aspirado pelo Venturi devido à diminuição da pressão na garganta do Venturi, a pressão interna torna-se menor que a pressão externa levando a formação de vácuo responsável pela aspiração do ar, o que se dá devido ao aumento da velocidade do fluido na garganta do Venturi (SANTOS; ALEGRE, 2007). O que deve ocorrer neste caso é que para vazões de reciclo de água residuária muito baixas e muito altas a pressão do interior da garganta do Venturi diminui menos (em relação às vazões intermediárias estudadas) em relação a pressão externa causando menor vácuo.

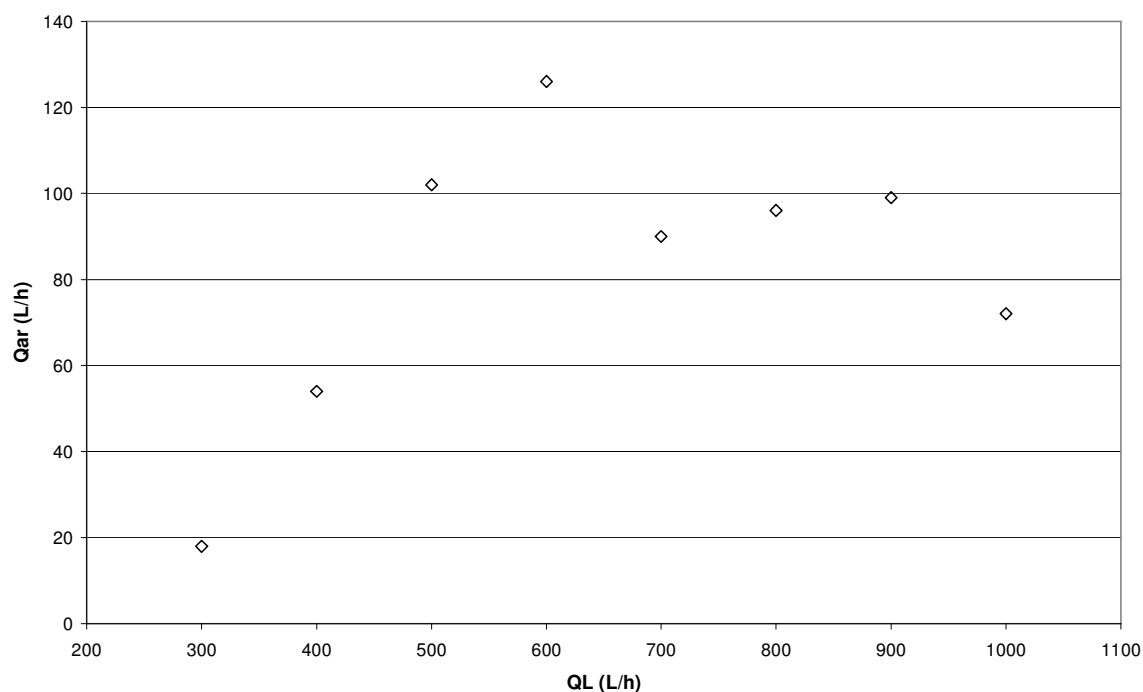


Figura 5.1 – Vazão de ar (Q_{ar}) em função da vazão de água residuária recirculada (Q_L) através do Venturi 1.

Observando-se a Figura 5.2 percebe-se que a eficiência de separação de sólidos no sistema de flotação manteve-se entre 60 e 100% e que não apresentou relação direta com o aumento da vazão de ar (Q_{ar}) apresentado na figura anterior, o que era esperado. É possível perceber que maiores vazões de ar não foram responsáveis por maiores eficiências de separação.

Observa-se nesta figura (Tabela B1 do apêndice B) que as melhores eficiências de separação ocorreram para Q_L de 900 e 800 L.h⁻¹, 83,33 e 83,80%, que equivalem, respectivamente, a Q_{ar} de 99 e 96 L.h⁻¹. A maior vazão de ar, 126 L.h⁻¹, foi alcançada para Q_L de 600 L.h⁻¹ e a eficiência obtida nestas condições não foi a melhor, o que pode ter ocorrido devido à coalescência das bolhas de ar, ocasionando a formação de bolhas maiores que aderem-se mais dificilmente aos flocos (SANTOS; ALEGRE, 2007).

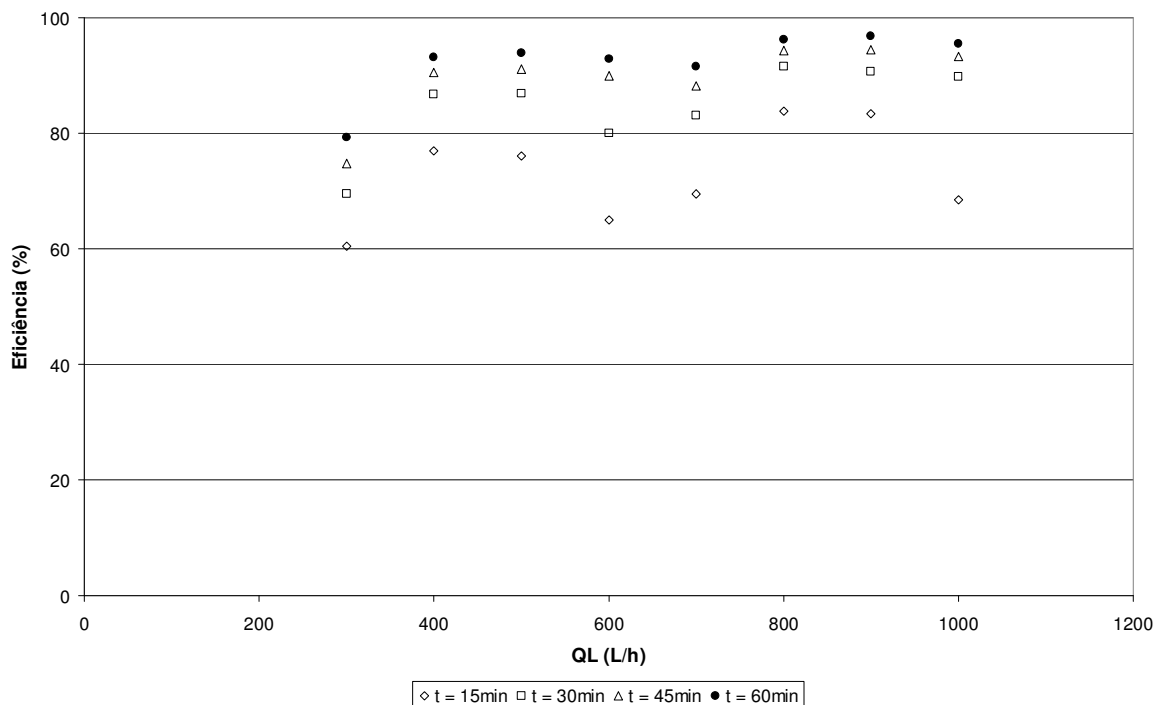


Figura 5.2 – Eficiência de separação de sólidos dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 1 em função da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) para diferentes tempos de flotação.

Na Figura 5.3 observa-se que as vazões de 800 e 900 $L.h^{-1}$ apresentaram os melhores resultados de eficiência de separação de sólidos para todos os tempos de flotação; já a vazão de água residuária de 300 $L.h^{-1}$ apresentou os menores valores de eficiência de separação para todos os tempos estudados. Fica claro neste gráfico que vazões mais altas de reciclo de água residuária tendem a fornecer maiores eficiências de separação para mesmo tempo de flotação. Observa-se também que maiores tempos de flotação acarretaram em maiores eficiências de separação para todas as vazões de reciclo de água residuária estudadas, porém para $t = 15$ min os valores de eficiência são bem menores. Já entre 45 e 60 min não houve grande diferença entre os valores de eficiência encontrados.

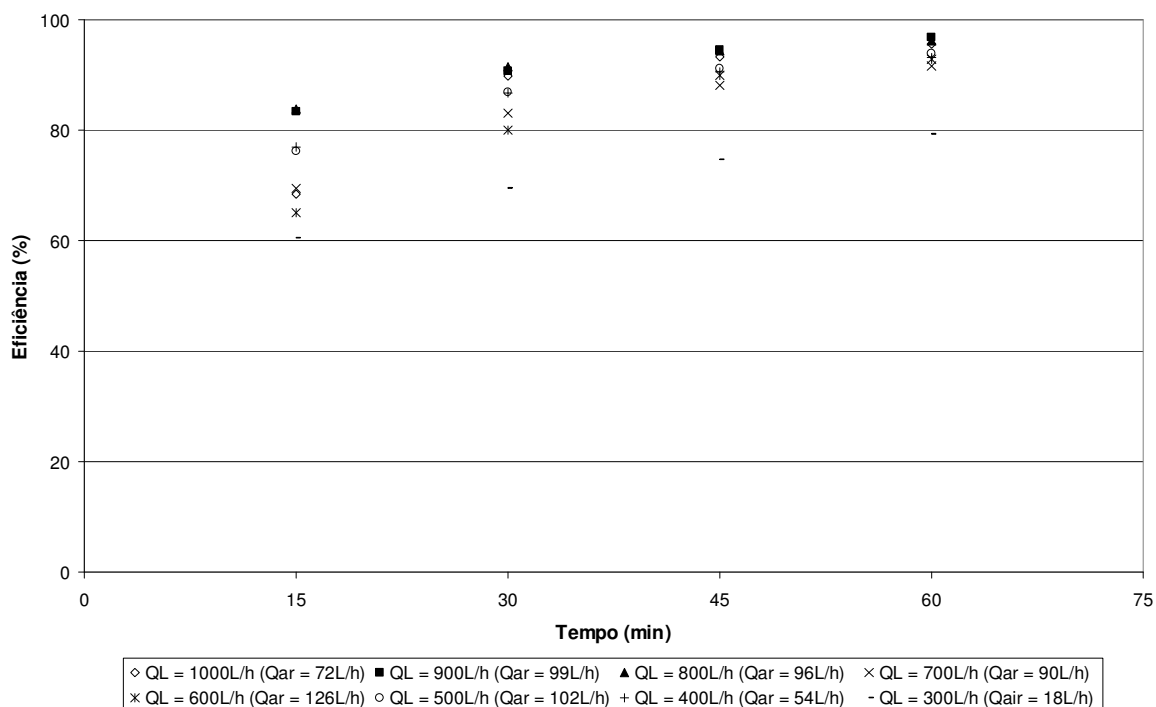


Figura 5.3 – Eficiência de separação de sólidos por flotação dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 1 em função do tempo de reciclo para diferentes vazões de reciclo (Q_L).

Na Figura 5.4 pode ser observado o resumo do Teste de Tukey realizado, a nível de significância de 0,05, para verificar se as eficiências obtidas com o Venturi 1 apresentam diferença estatística significativa em diferentes condições. A análise estatística está apresentada nas Tabelas do Apêndice B. Os valores de eficiência de separação (%) estão apresentados na Tabela B1 do referido apêndice.

As letras maiúsculas representam a comparação entre as eficiências obtidas para mesma vazão de reciclo de água residuária (Q_L) e diferentes tempos de flotação. Já as letras minúsculas representam a comparação entre as eficiências obtidas para mesmo tempo de flotação e diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L). Em ambos os casos ao menos uma letra comum entre

duas condições demonstra que não há diferença estatística significativa entre as eficiências obtidas nestas condições.

Para tempo de flotação de 15 min, observa-se que as eficiências obtidas com vazões de reciclo de água residuária (Q_L) de 800 e 900 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação a eficiência com Q_L de 300 $L.h^{-1}$.

Para tempo de flotação de 30 min, não houve diferença estatística significativa entre as eficiências obtidas com as diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L) estudadas.

Para tempo de flotação de 45 min, observa-se que as eficiências obtidas com vazões de reciclo de água residuária (Q_L) de 1000, 900, 800, 600, 500 e 400 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação a eficiência com Q_L de 300 $L.h^{-1}$. Já a eficiência obtida com Q_L de 700 $L.h^{-1}$ não apresentou diferença estatística significativa em relação as eficiências para as outras vazões de reciclo de água residuária estudadas.

Para tempo de flotação de 60min, observa-se que as eficiências obtidas com vazões de reciclo de água residuária (Q_L) de 1000, 900, 800, 700, 600, 500 e 400 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação a Q_L de 300 $L.h^{-1}$.

É possível verificar pela análise estatística, que apenas as eficiências obtidas para Q_L de 300 $L.h^{-1}$ mostraram-se significativamente diferentes das eficiências para outras vazões para a maioria dos tempos de reciclo estudados, com exceção do tempo de 30 min no qual não houve diferença estatística significativa entre as eficiências para as diferentes vazões de reciclo de água residuária estudadas. Observa-se ainda que para tempos de flotação de 45 e 60 min a grande maioria das vazões estudadas apresentou diferença estatística significativa.

Fazendo a comparação das eficiências de separação obtidas para mesma vazão e diferentes tempos de flotação é possível fazer as seguintes observações:

Para Q_L de 1000, 700 e 400 $L.h^{-1}$ apenas a eficiência obtida para tempo de flotação de 15min apresentou diferença estatística significativa para tempos de flotação de 30, 45 e 60 min.

Para Q_L de 900 $L.h^{-1}$ a eficiência obtida para tempo de flotação de 15 min, apresentou diferença estatística significativa para tempos de flotação de 30, 45 e 60 min. Ainda para esta vazão, a eficiência obtida para tempo de flotação de 30 min apresentou diferença estatística significativa em relação a tempo de flotação de 60 min.

Para Q_L de 800 $L.h^{-1}$ as eficiências obtidas para todos os tempos de flotação estudados (15, 30, 45 e 60 min) apresentaram diferença estatística significativa entre si.

Para Q_L de 600 e 300 $L.h^{-1}$ não houve diferença estatística significativa entre as eficiências obtidas para todos os tempos de flotação estudados (15, 30, 45 e 60 min).

Para Q_L de 500 $L.h^{-1}$ a eficiência obtida para tempo de flotação de 15 min apresentou diferença estatística significativa apenas da eficiência obtida para tempo de reciclo de 60 min.

É possível verificar pela análise estatística, que as eficiências obtidas para tempo de flotação de 15 min mostraram-se significativamente diferentes em relação a outros tempos de flotação, para a maioria das vazões de reciclo de água residuária estudadas. Assim, percebe-se que para tempo de flotação maior ou igual a 30min são obtidos bons resultados de eficiência de separação de sólidos.

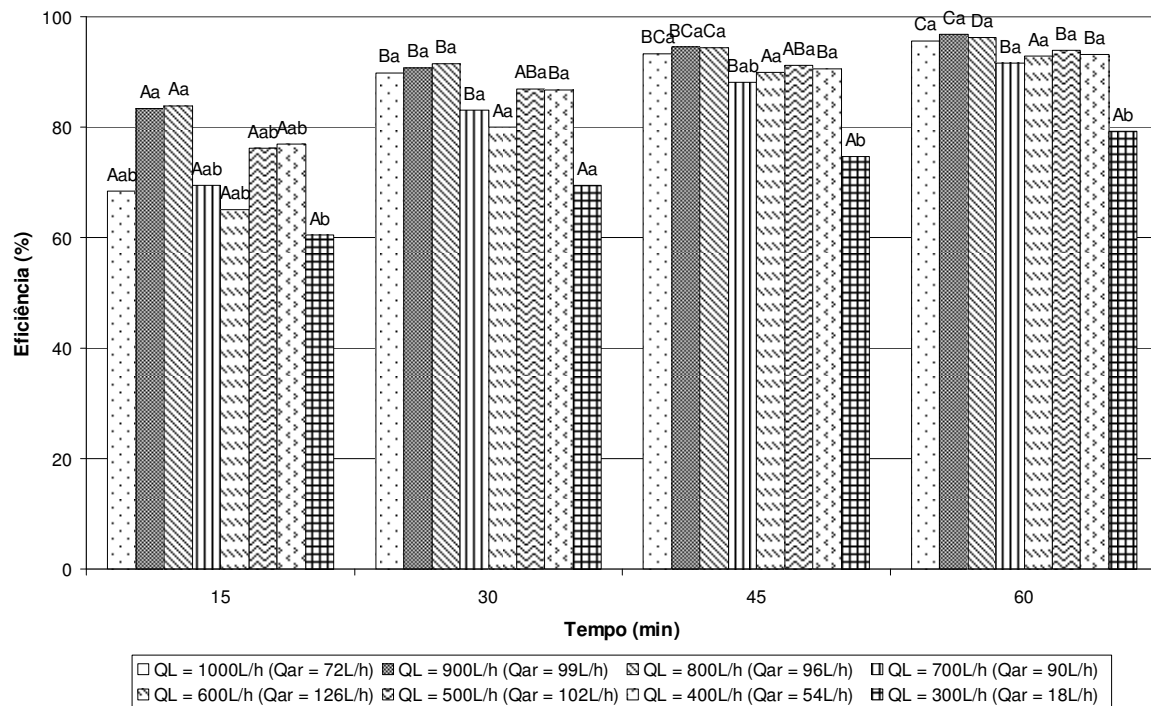


Figura 5.4 – Eficiência de separação de sólidos por flotação dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 1 (Letras maiúsculas: mesma vazão de reciclo de água residuária, diferentes tempos. Letras minúsculas: mesmo tempo, diferentes vazões de reciclo de água residuária).

5.1.2 Experimentos conduzidos com o segundo Venturi (V2)

Observando-se a Figura 5.5 percebe-se, a direita do gráfico, que a vazão de ar (Q_{ar}) apresenta tendência à diminuição para valores maiores de vazão de reciclo de água residuária (Q_L), o mesmo observado para o Venturi 1 anteriormente.

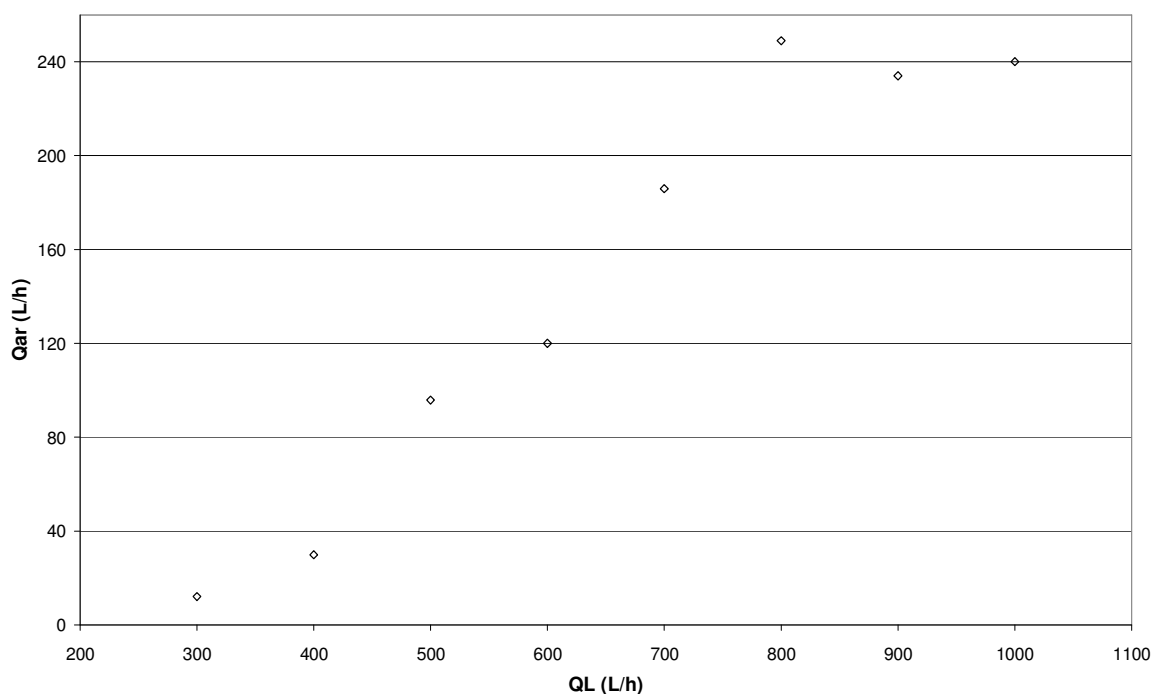


Figura 5.5 – Vazão de ar (Q_{ar}) em função da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) no Venturi 2.

A Figura 5.6 apresenta resultados obtidos com o segundo Venturi (V2), na qual também observam-se maiores eficiências de remoção para maiores tempos de flotação. Observando-se as Figuras 5.6 e 5.7 percebe-se que maiores vazões de reciclo de água residuária (Q_L) e, conseqüentemente, maiores vazões de ar (Q_{ar}) resultaram em melhores eficiências de separação de sólidos.

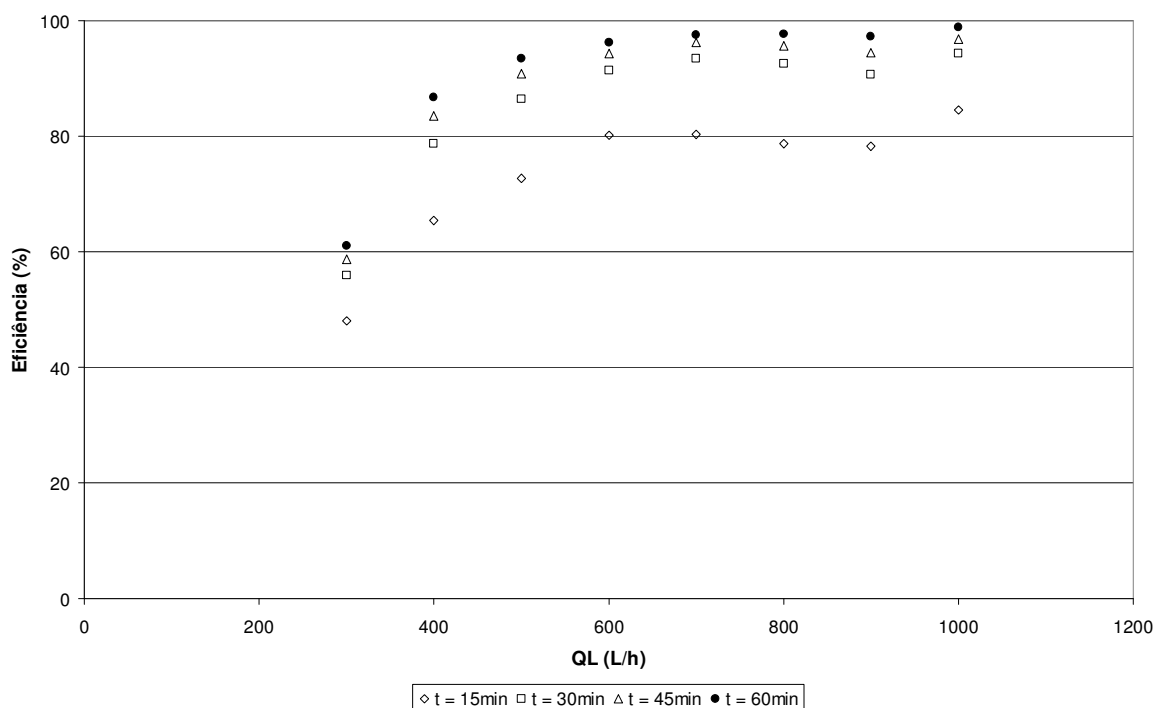


Figura 5.6 - Eficiência de separação de sólidos dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 2 em função da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) para diferentes tempos de flotação.

Na Figura 5.7 é possível constatar que a vazão de reciclo de água residuária de 300 L.h^{-1} apresentou menores resultados de eficiência de separação de sólidos para todos os tempos de reciclo estudados, enquanto que a vazão de 1000 L.h^{-1} apresentou as maiores eficiências de separação para todos os tempos. Observa-se novamente que a eficiência de separação de sólidos aumentou com o aumento da vazão de reciclo de água residuária.

Observa-se que embora a maior vazão de ar (Q_{ar}), 249 L.h^{-1} , tenha sido alcançada para Q_L de 800 L.h^{-1} a melhor eficiência de separação não ocorreu nesta condição, o que pode ter ocorrido devido ao fenômeno de coalescência que é a união de bolhas de ar responsável pela formação de bolhas maiores, o que desfavorece a adesão bolha-floco.

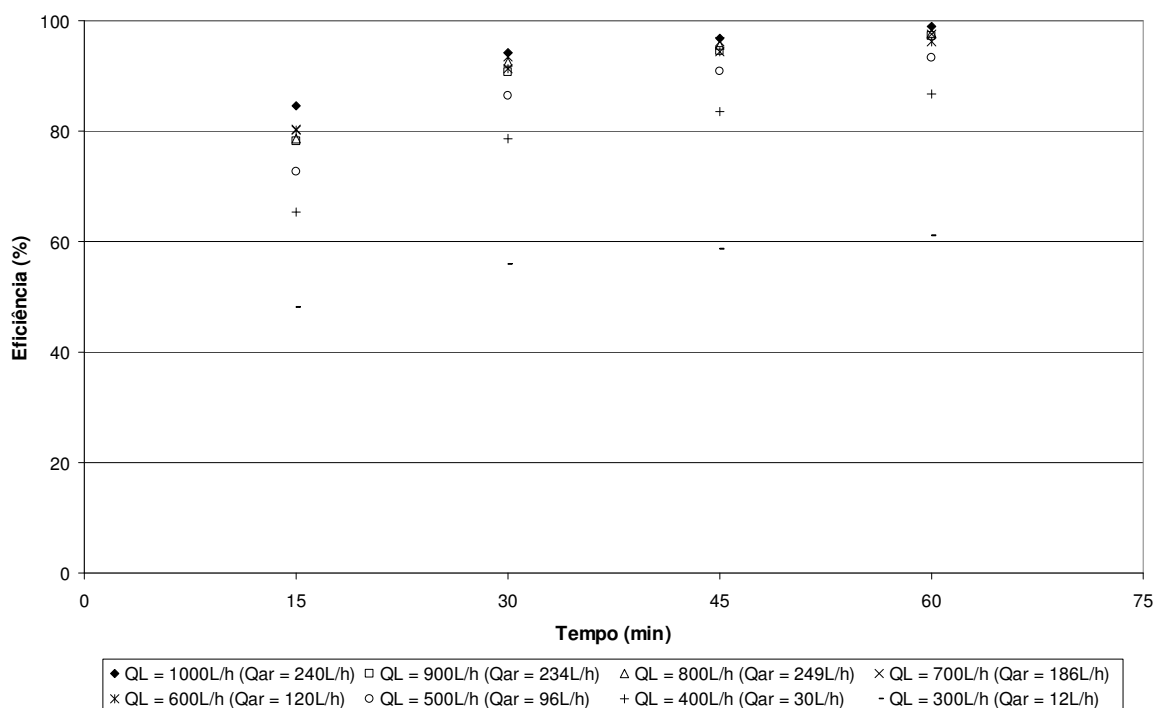


Figura 5.7 – Eficiência de separação de sólidos por flotação dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 2 em função do tempo para diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L).

Na Figura 5.8 pode ser observado o resumo do Teste de Tukey realizado, a nível de significância de 0,05, para verificar se as eficiências obtidas com o Venturi 2 apresentam diferença estatística significativa em diferentes condições. A análise estatística está apresentada nas Tabelas do Apêndice C. Os valores de eficiência de separação (%) estão apresentados na Tabela C1 do referido apêndice.

As letras maiúsculas representam a comparação entre as eficiências obtidas para mesma vazão de reciclo de água residuária (Q_L) e diferentes tempos de flotação. Já as letras minúsculas representam a comparação entre as eficiências obtidas para mesmo tempo de flotação e diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L). Em ambos os casos ao menos uma letra comum entre

duas condições significa que não há diferença estatística significativa entre as eficiências obtidas nestas condições.

Para tempo de flotação de 15 min, observa-se que as eficiências obtidas com vazões de reciclo de água residuária (Q_L) de 1000, 800, 700 e 600 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação as eficiências com Q_L de 400 e 300 $L.h^{-1}$. Já as eficiências obtidas com vazões de reciclo de água residuária (Q_L) de 900, 500 e 400 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação a eficiência obtida com Q_L de 300 $L.h^{-1}$ apenas.

Para tempo de flotação de 30 e 45 min a eficiência obtida para Q_L de 1000 $L.h^{-1}$ apresentou diferença estatística significativa em relação as eficiências para vazões de reciclo de água residuária (Q_L) de 500, 400 e 300 $L.h^{-1}$. Já as eficiências obtidas para vazões de reciclo de água residuária (Q_L) de 900, 800, 700, 600 e 500 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação a valores de Q_L de 400 e 300 $L.h^{-1}$. As eficiências obtidas para Q_L de 400 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação as eficiências para Q_L de 300 $L.h^{-1}$.

Para tempo de flotação de 60 min, observa-se que as eficiências obtidas com vazões de reciclo de água residuária (Q_L) de 1000, 800 e 700 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação a Q_L de 500, 400 e 300 $L.h^{-1}$. Enquanto que as eficiências obtidas para Q_L 900, 600 e 500 $L.h^{-1}$, apresentaram diferença estatística significativa em relação a eficiência com Q_L de 400 e 300 $L.h^{-1}$. As eficiências de separação obtidas para Q_L de 400 e 300 $L.h^{-1}$ também apresentaram diferença estatística significativa entre si.

Percebe-se que as eficiências obtidas para maiores vazões de reciclo de água residuária (Q_L) apresentaram diferença estatística significativa das eficiências para Q_L menores, não apresentando diferença entre si.

É possível verificar pela análise estatística que as eficiências obtidas para Q_L de 400 e 300 $L.h^{-1}$ mostraram-se significativamente diferentes das eficiências para outras vazões para a maioria dos tempos estudados.

Comparando as eficiências de separação obtidas para mesma vazão e diferentes tempos de flotação é possível fazer as seguintes observações:

Para Q_L de 1000 $L.h^{-1}$ as eficiências obtidas para todos os tempos de flotação apresentaram diferença estatística significativa entre si.

Para Q_L de 900, 800, 700, 500 e 400 $L.h^{-1}$ as eficiências obtidas para tempo de flotação de 15 min apresentaram diferença estatística significativa das eficiências para tempos de flotação de 30, 45 e 60 min.

Para Q_L de 600 $L.h^{-1}$ a eficiência obtida para tempo de flotação de 15 min apresentou diferença estatística significativa das eficiências para tempos de flotação de 30, 45 e 60 min. Já a eficiência obtida para tempo de flotação de 30 min apresentou diferença estatística significativa em relação a eficiência para tempo de flotação de 60 min.

É possível verificar, pela análise estatística, que as eficiências obtidas para tempo de flotação de 15 min mostraram-se significativamente diferentes das eficiências para outros tempos de flotação para a maioria das vazões de reciclo de água residuária estudadas, da mesma forma que foi possível observar nos estudos com o Venturi 1.

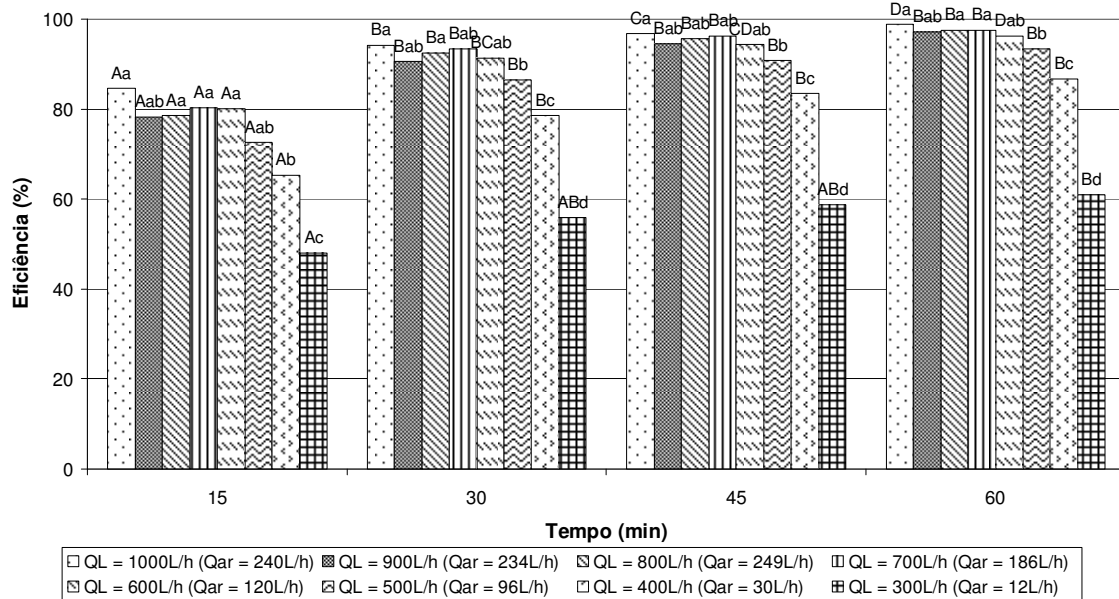


Figura 5.8 – Eficiência de separação de sólidos por flotação dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 2 (Letras maiúsculas: mesma vazão de reciclo de água residuária, diferentes tempos. Letras minúsculas: mesmo tempo, diferentes vazões de reciclo de água residuária).

5.1.3 Experimentos conduzidos com o terceiro Venturi (V3)

Na Figura 5.9 observa-se, inicialmente, que a vazão de ar aspirado pelo Venturi aumentou em função da vazão de reciclo de água residuária, manteve-se praticamente constante entre Q_L de 800 e 1100 $L.h^{-1}$, cerca de 240 $L.h^{-1}$, e depois diminuiu até 110 $L.h^{-1}$, mostrando que existe uma faixa de vazão de reciclo de água residuária para a qual a aspiração de ar pelo Venturi é máxima.

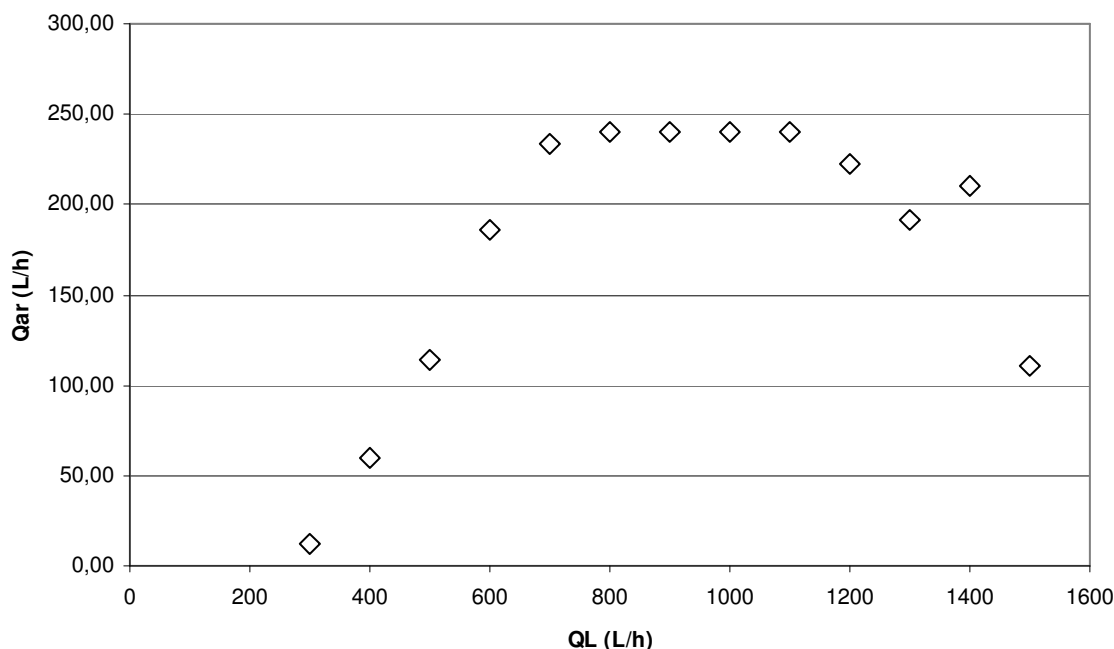


Figura 5.9 – Vazão de ar (Q_{ar}) em função da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) no Venturi 3.

Observando-se a Figura 5.10 percebe-se que a eficiência de separação de sólidos no flotador, utilizando o Venturi 3, aumentou com o aumento da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) e, conseqüentemente, com a vazão de ar (Q_{ar}), o que pode ter resultado na formação de maior número de bolhas de ar, aumentando a área de contato e a probabilidade de choque entre bolhas de ar e os sólidos e, conseqüentemente, melhorando a flotação (SANTOS et al., 2006). Contudo, para vazões de reciclo de água residuária maiores que 800 L.h^{-1} , observa-se que ocorreu uma ligeira queda na eficiência de separação de sólidos, provavelmente devido à coalescência de bolhas no tubo após o Venturi, formando bolhas grandes nas quais os sólidos se adsorvem com mais dificuldade.

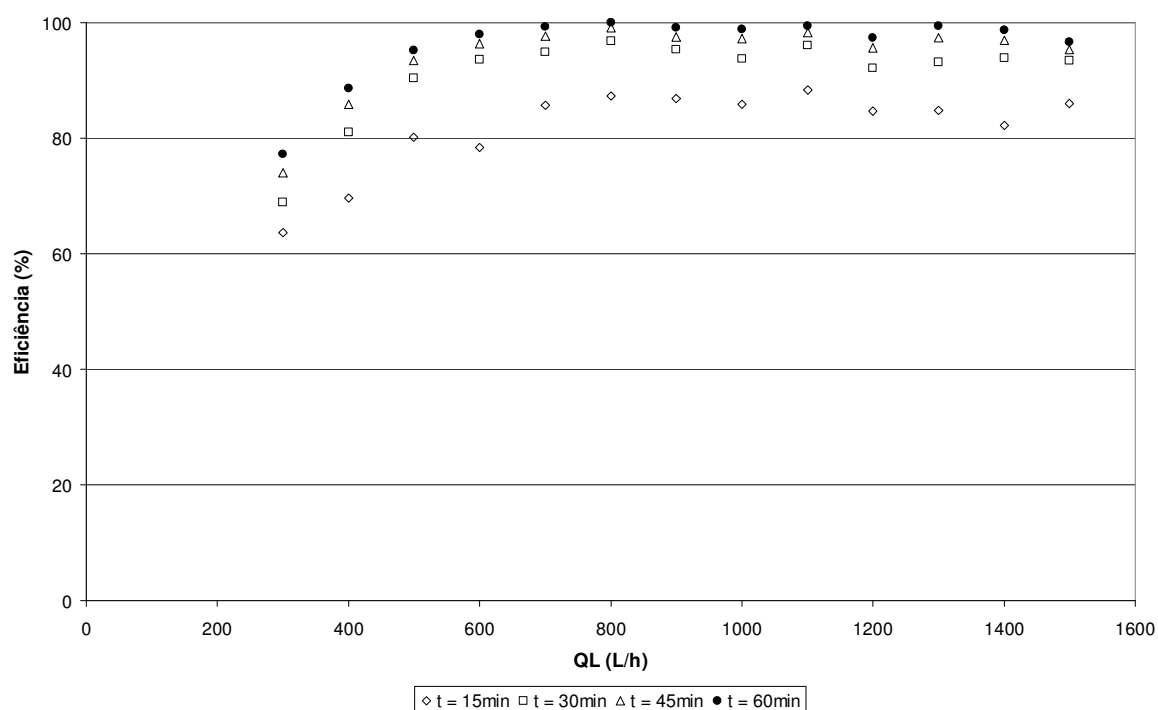


Figura 5.10 – Eficiência de separação de sólidos por flotação dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 3 em função da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) para diferentes tempos de flotação.

Na Figura 5.11 observa-se menores eficiências de separação de sólidos (%) para menores vazões de reciclo de água residuária (Q_L), já o aumento da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) e conseqüente aumento da vazão de ar (Q_{ar}) gerou aumento da eficiência de separação de sólidos.

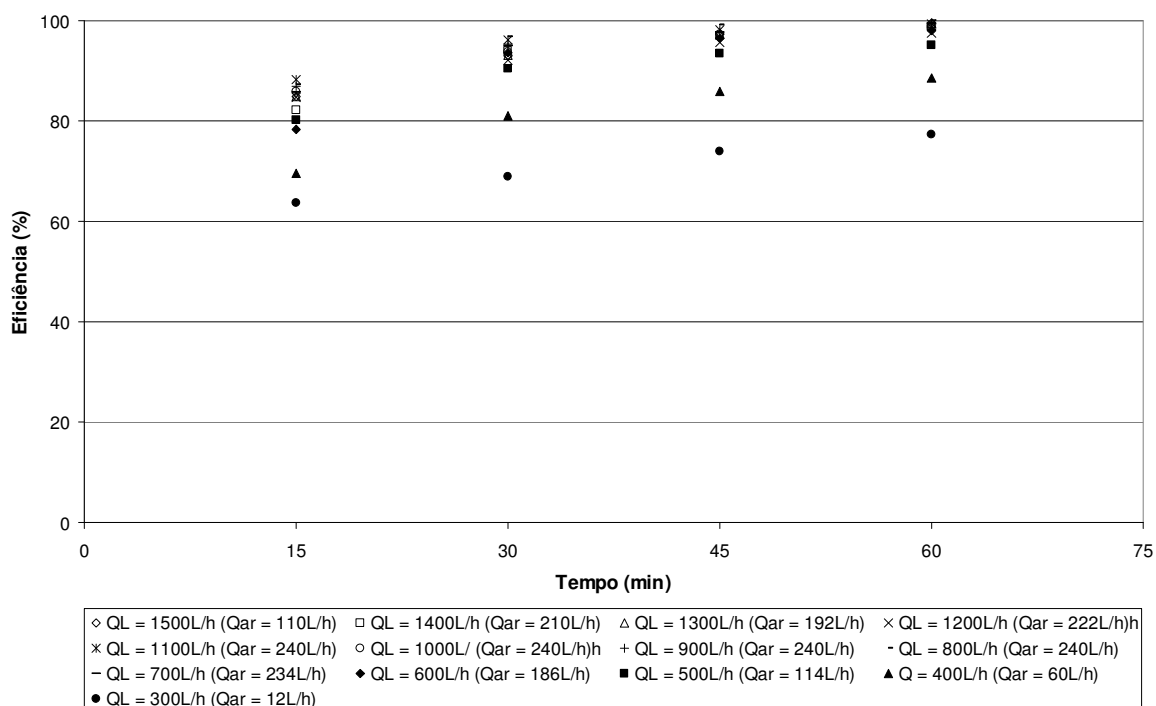


Figura 5.11 – Eficiência de separação de sólidos por flotação dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 3 em função do tempo (min) para diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L).

Na Figura 5.12 pode ser observado o resumo do Teste de Tukey realizado, a nível de significância de 0,05, para verificar se as eficiências obtidas com o Venturi 3 apresentam diferença estatística significativa em diferentes condições. A análise estatística está apresentada nas Tabelas do Apêndice D. Os valores de eficiência de separação (%) estão apresentados na Tabela D1 do referido apêndice.

As letras maiúsculas representam a comparação entre as eficiências obtidas para mesma vazão de reciclo de água residuária (Q_L) e diferentes tempos de flotação. Já as letras minúsculas representam a comparação entre as eficiências obtidas para mesmo tempo de flotação e diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L). Em ambos os casos ao menos uma letra comum entre

duas condições significa que não há diferença estatística significativa entre as eficiências obtidas nestas condições.

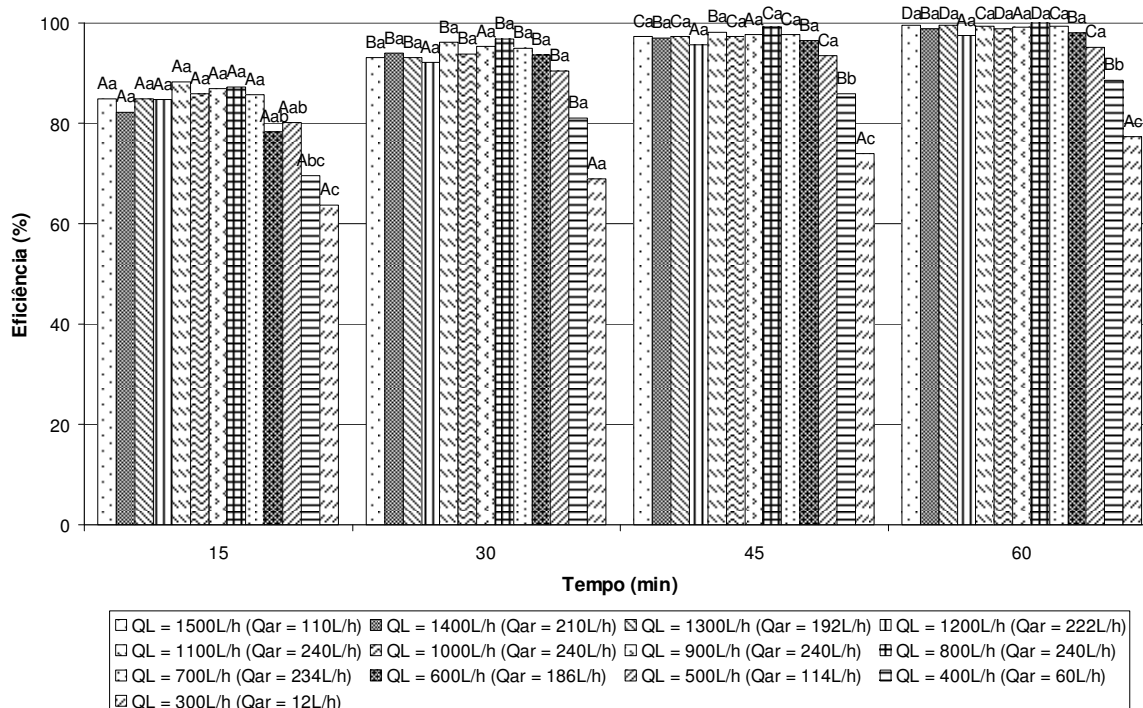


Figura 5.12 – Eficiência de separação de sólidos por flotação dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 3 (Letras maiúsculas: mesma vazão de reciclo de água residuária (Q_L), diferentes tempos. Letras minúsculas: mesmo tempo, diferentes vazões de reciclo de água residuária).

Para tempo de flotação de 15 min observa-se que as eficiências obtidas com as vazões de reciclo de água residuária (Q_L) de 1500, 1400, 1300, 1200, 1100, 1000, 900, 800 e 700 $L.h^{-1}$, apresentaram diferença estatística significativa em relação as eficiências com Q_L de 400 e 300 $L.h^{-1}$. Já as eficiências obtidas com as vazões de reciclo de água residuária (Q_L) de 600 e 500 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação a Q_L de 300 $L.h^{-1}$ apenas. Além disso,

as eficiências obtidas para Q_L de 400 e 300 $L.h^{-1}$ não apresentaram diferença estatística significativa entre si.

Para tempo de flotação de 30 min as eficiências obtidas para todas as vazões de reciclo de água residuária estudadas não apresentaram diferença estatística significativa.

Para tempo de flotação de 45 e 60 min as eficiências obtidas com vazões de reciclo de água residuária de 1500, 1400, 1300, 1200, 1100, 1000, 900, 800, 700, 600, e 500 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação as eficiências com Q_L de 400 e 300 $L.h^{-1}$. Já para Q_L de 400 $L.h^{-1}$ a eficiência obtida apresentou diferença estatística significativa em relação a Q_L de 300 $L.h^{-1}$.

Percebe-se que as eficiências obtidas para maiores vazões de reciclo de água residuária (Q_L) apresentaram diferença estatística significativa das eficiências para valores de Q_L menores, não apresentando diferença entre si.

É possível verificar pela análise estatística que as eficiências obtidas para Q_L de 400 e 300 $L.h^{-1}$ mostraram-se significativamente diferentes das eficiências para outras vazões para a maioria dos tempos estudados.

Comparando-se as eficiências de separação obtidas para mesma vazão e diferentes tempos de flotação é possível fazer as seguintes observações:

Para Q_L de 1500, 1300, 1000 e 800 $L.h^{-1}$ as eficiências obtidas para todos os tempos de flotação apresentaram diferença estatística significativa entre si.

Para Q_L de 1400, 600 e 400 $L.h^{-1}$ a eficiência obtida para tempo de flotação de 15min, apresentou diferença estatística significativa das eficiências para tempos de flotação de 30, 45 e 60 min.

Para Q_L de 1200, 900 e 300 $L.h^{-1}$ as eficiências obtidas para todos os tempos de flotação estudados não apresentaram diferença estatística entre si.

Para Q_L de 1100 L.h^{-1} a eficiência obtida para tempo de flotação de 15 min apresentou diferença estatística significativa das eficiências para tempo de flotação de 30, 45 e 60 min. Já a eficiência obtida para tempo de flotação de 30min apresentou diferença estatística significativa da eficiência para tempo de flotação de 60min.

Para Q_L de 700 e 500 L.h^{-1} a eficiência obtida para tempo de flotação de 15min, apresentou diferença estatística significativa em relação as eficiências para tempos de flotação de 30, 45 e 60 min. Já a eficiência de separação obtida para tempo de flotação de 30 min, apresentou diferença estatística significativa em relação as eficiências para tempos de flotação de 45 e 60 min.

É possível verificar, pela análise estatística, que as eficiências obtidas para tempo de flotação de 15 min mostraram-se significativamente diferentes das eficiências para outros tempos de flotação para a maioria das vazões de reciclo de água residuária estudadas, da mesma forma que foi possível observar nos estudos com os tubos Venturi 1 e 2.

5.1.4 Experimentos conduzidos com o quarto Venturi (V4)

Na Figura 5.13 observa-se inicialmente que a vazão de ar aspirada pelo Venturi aumentou em função da vazão de reciclo de água residuária, alcançando valor máximo para Q_L de 1200 e 1300 L.h^{-1} , cerca de 530 L.h^{-1} , e depois diminuindo até cerca de 340 L.h^{-1} .

O aumento da velocidade na garganta do Venturi, obtido através do aumento da vazão de reciclo de água residuária (Q_L), causa diminuição da pressão no interior da garganta do Venturi, o que faz com que a pressão interna seja menor do que a pressão ambiente e o ar seja aspirado.

Também neste caso, percebe-se que a aspiração de ar pelo Venturi passa por uma faixa de máximo.

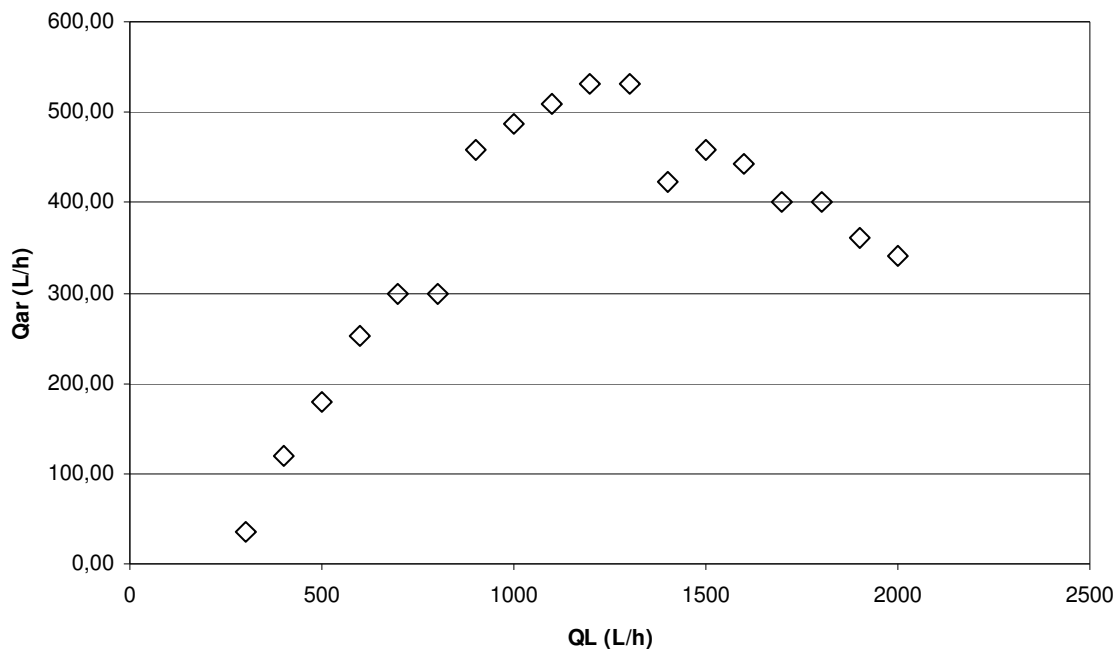


Figura 5.13 – Vazão de ar (Q_{ar}) em função da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) no Venturi 4.

Observando-se a Figura 5.14 percebe-se que a eficiência de separação de sólidos da água residuária do flotador utilizando o Venturi 4 aumentou com o aumento da vazão de reciclo da mesma (Q_L). Observa-se ainda maiores eficiências de separação de sólidos para maiores tempos de flotação. Embora tenham sido alcançadas maiores vazões de ar para valores de Q_L em torno de 1300 L.h^{-1} , maiores eficiências de separação de sólidos foram encontradas para maiores vazões de reciclo de água residuária, ou seja, as maiores eficiências não foram encontradas para maiores valores de Q_{ar} . Embora tenha sido aspirado menos ar para estas vazões (2000, 1900 e 1800 L.h^{-1}), a velocidade com a qual o fluido passa na garganta do Venturi promove o cisalhamento das bolhas de ar que estão se formando, produzindo bolhas de ar de menor tamanho que são mais eficientes na remoção da matéria suspensa. Este fato não aconteceu com os experimentos realizados com os tubos Venturi 1, 2 e 3 devido a geometria destes

tubos Venturi, que promovia queda da velocidade de ar na garganta do Venturi, para valores muito altos de Q_L levando a aspiração de menor quantidade de ar ou até mesmo expulsão de água pelo orifício de entrada de ar.

Observa-se ainda, que para maiores vazões de reciclo de água residuária a diferença entre as eficiências obtidas para diferentes tempos de flotação diminui, ou seja, para altas valores de Q_L , acima de 1800 L.h^{-1} , o tempo não influencia tanto a eficiência de separação de sólidos no equipamento.

Observando-se as Figuras 5.14 e 5.15, para o mesmo tempo de flotação, maiores vazões de reciclo de água residuária forneceram maiores eficiências de separação de sólidos, eficiências próximas de 100% de separação de sólidos foram alcançadas para vazões de reciclo de água residuária acima de 1200 L.h^{-1} .

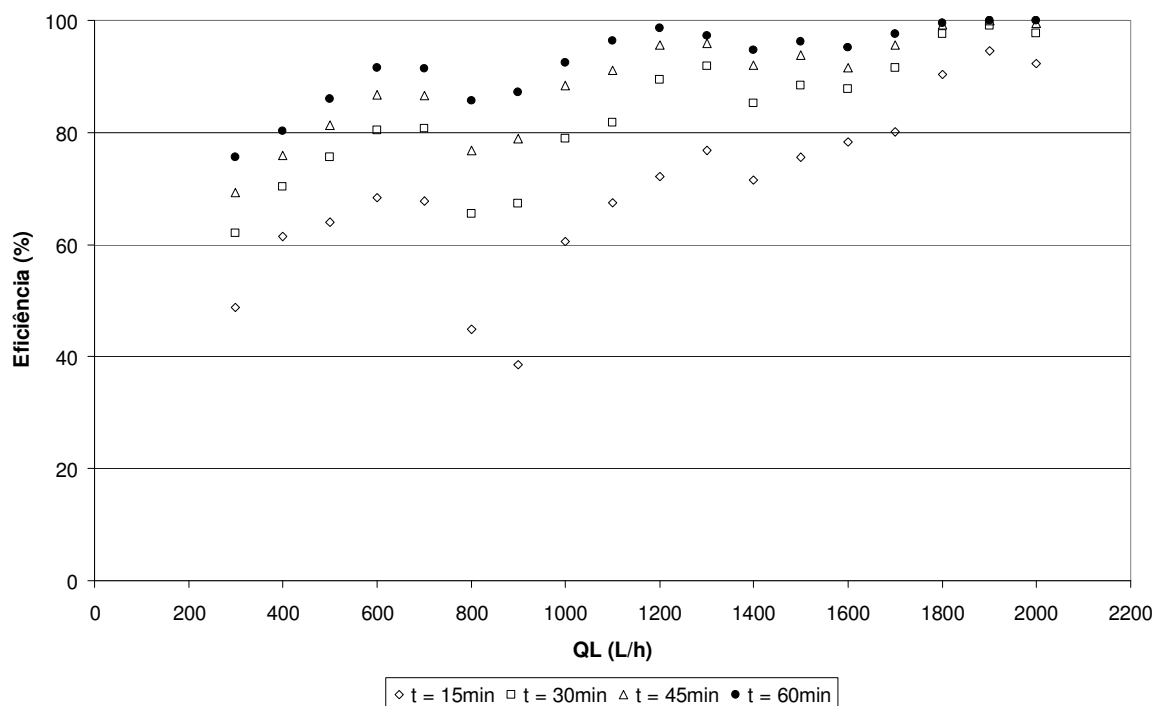


Figura 5.14 – Eficiência de separação de sólidos dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 4 em função da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) para diferentes tempos de flotação.

Na Figura 5.15 observa-se menores eficiências de separação de sólidos (%) para menores vazões de reciclo de água residuária (Q_L), já o aumento da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de maneira geral refletiu no aumento da eficiência de separação de sólidos.

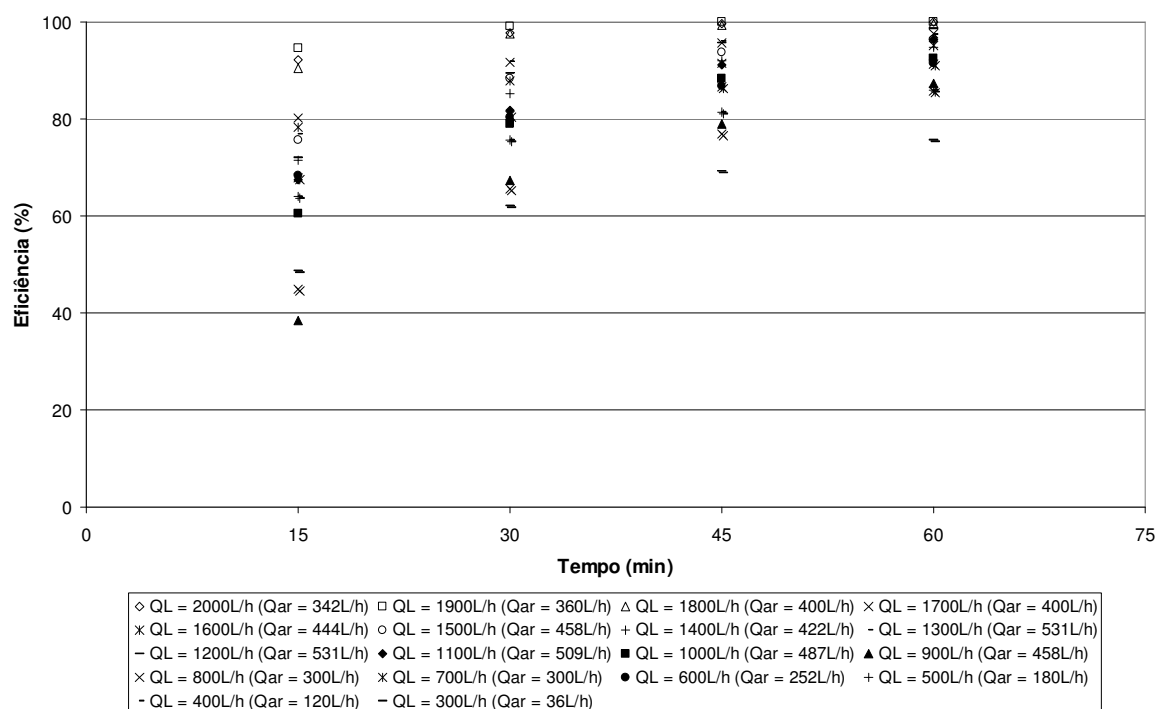


Figura 5.15 – Eficiência de separação de sólidos por flotação dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 4 em função do tempo para diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L).

Na Figura 5.16 pode ser observado o resumo do Teste de Tukey realizado, a nível de significância de 0,05, para verificar se as eficiências, obtidas com o Venturi 4, apresentam diferença estatística significativa em diferentes condições. A análise estatística está apresentada nas Tabelas do Apêndice E. Os valores de

eficiência de separação (%) estão apresentados na Tabela E1 do referido apêndice.

As letras maiúsculas representam a comparação entre as eficiências obtidas para mesma vazão de reciclo de água residuária (Q_L) e diferentes tempos de flotação. Em ambos os casos, ao menos uma letra comum entre duas condições significa que não há diferença estatística significativa entre as eficiências obtidas nestas condições.

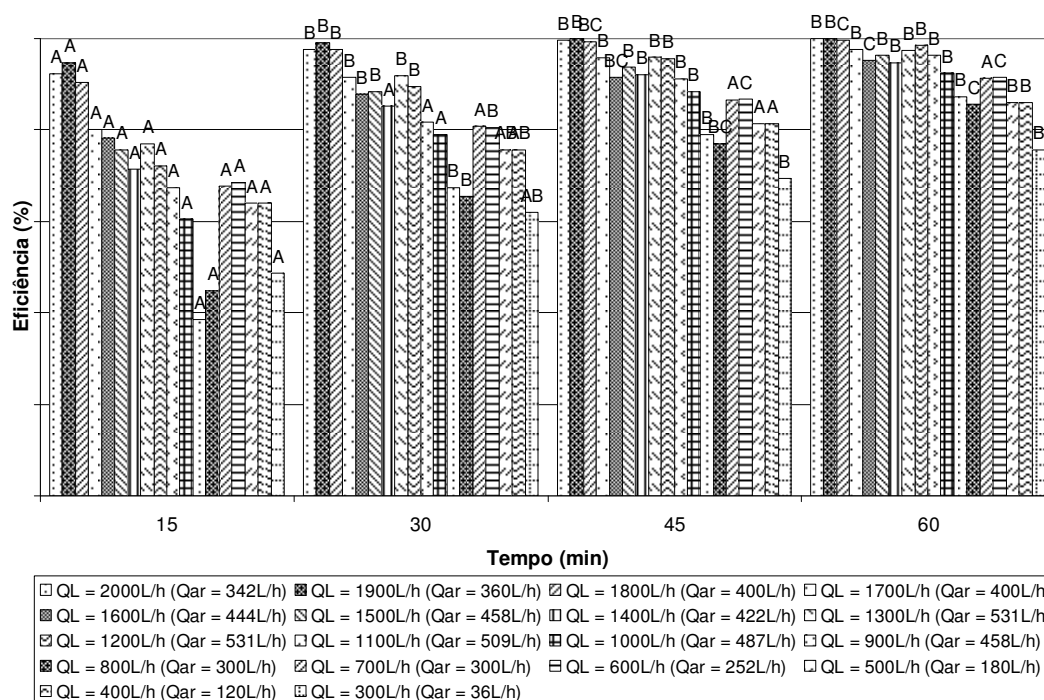


Figura 5.16 – Eficiência de separação de sólidos por flotação dos experimentos nos quais foi utilizado o Venturi 4 (Letras maiúsculas: mesma vazão de reciclo de água residuária, diferentes tempos).

Para tempo de flotação de 15 min observa-se que a eficiência obtida com vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 2000 L.h⁻¹ apresentou diferença

estatística significativa em relação as eficiências com Q_L de 1100, 1000, 900, 800, 700, 600, 500, 400 e 300 $L.h^{-1}$. Já a eficiência obtida com vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 1900 $L.h^{-1}$ apresentou diferença estatística significativa em relação a eficiência com Q_L de 1400, 1200, 1100, 1000, 900, 800, 700, 600, 500, 400 e 300 $L.h^{-1}$. Além disso, a eficiência obtida para Q_L de 1800 $L.h^{-1}$ apresentou diferença estatística significativa em relação as eficiências para Q_L de 1100, 1000, 900, 800, 700, 500, 400 e 300 $L.h^{-1}$. As eficiências obtidas com Q_L de 1700, 1600, 1500, 1400, 1300, 1200 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação as eficiências para Q_L de 900, 800 e 300 $L.h^{-1}$. A eficiência obtida para Q_L de 900 $L.h^{-1}$ apresentou diferença estatística significativa em relação as eficiências para Q_L de 700, 600, 500 e 400 $L.h^{-1}$. A eficiência obtida para Q_L de 800 $L.h^{-1}$ apresentou diferença estatística significativa em relação as eficiências para Q_L de 700 e 600 $L.h^{-1}$.

Para tempo de flotação de 30 min as eficiências obtidas para Q_L de 2000 e 1800 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação as eficiências para vazões de água residuária de 900, 800, 500, 400 e 300 $L.h^{-1}$. A eficiência obtida para vazão de 1900 $L.h^{-1}$ apresentou diferença estatística significativa das eficiências para Q_L de 1000, 900, 800, 500, 400 e 300 $L.h^{-1}$. As eficiências obtidas para Q_L de 1700 e 1300 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação as eficiências para Q_L de 900, 800, 400 e 300 $L.h^{-1}$. As eficiências obtidas para Q_L de 1600, 1500 e 1200 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação as eficiências para Q_L de 900, 800 e 300 $L.h^{-1}$. A eficiência obtida para vazão de 1400 $L.h^{-1}$ apresentou diferença estatística significativa das eficiências para Q_L de 800 e 300 $L.h^{-1}$. A eficiência obtida para vazão de 1100 $L.h^{-1}$ apresentou diferença estatística significativa da eficiência para Q_L de 300 $L.h^{-1}$.

Para tempo de flotação de 45 min as eficiências obtidas para Q_L de 2000, 1900, 1800 e 1300 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação as eficiências para Q_L de 900, 800, 500, 400 e 300 $L.h^{-1}$. Já as eficiências obtidas para Q_L de 1700, 1500 e 1200 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística

significativa em relação as eficiências para Q_L de 900, 800, 400 e 300 $L.h^{-1}$. As eficiências obtidas para Q_L de 1600 e 1400 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação as eficiências para Q_L de 800, 400 e 300 $L.h^{-1}$. A eficiência obtida para Q_L de 1100 $L.h^{-1}$ apresentou diferença estatística significativa em relação as eficiências para Q_L de 400 e 300 $L.h^{-1}$. As eficiências obtidas para Q_L de 1000, 700 e 600 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação a eficiência para Q_L de 300 $L.h^{-1}$.

Para tempo de flotação de 60 min, as eficiências obtidas com as vazões de reciclo de água residuária de 2000, 1900, 1800 e 1200 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação as eficiências com Q_L de 900, 800, 500, 400 e 300 $L.h^{-1}$. Já para Q_L de 1700 e 1300 $L.h^{-1}$ as eficiências obtidas apresentaram diferença estatística significativa em relação as eficiências para Q_L de 800, 500, 400 e 300 $L.h^{-1}$. As eficiências obtidas para Q_L de 1600, 1500, 1400, 1100, 1000, 700 e 600 $L.h^{-1}$ apresentaram diferença estatística significativa em relação as eficiências com Q_L de 400 e 300 $L.h^{-1}$. Já a eficiência obtida para Q_L de 900 $L.h^{-1}$ apresentou diferença estatística significativa apenas em relação a eficiência para Q_L de 300 $L.h^{-1}$.

A eficiência obtida para Q_L de 800 $L.h^{-1}$ não apresentou diferença estatística significativa em relação as eficiências para Q_L de 700, 600, 500, 400 e 300 $L.h^{-1}$.

A eficiência obtida para Q_L de 500 $L.h^{-1}$, não apresentou diferença estatística significativa em relação as eficiências para Q_L de 400 e 300 $L.h^{-1}$.

As eficiências obtidas para Q_L de 400 e 300 $L.h^{-1}$ não apresentaram diferença estatística significativa entre si.

Percebe-se que as eficiências obtidas para maiores vazões de reciclo de água residuária (Q_L) apresentaram diferença estatística significativa das eficiências para valores menores de Q_L , não apresentando diferença entre si.

É possível verificar pela análise estatística que as eficiências obtidas para Q_L de 400 e 300 $L.h^{-1}$ mostraram-se significativamente diferentes das eficiências para outras vazões para a maioria dos tempos estudados.

Comparando-se as eficiências de separação obtidas para mesma vazão de reciclo de água residuária e diferentes tempos de flotação é possível fazer as seguintes observações:

Para Q_L de 2000, 1900, 1700, 1500, 1300, 1200 e 900 $L.h^{-1}$ as eficiências obtidas para tempo de flotação de 15 min apresentaram diferença estatística significativa em relação as eficiências para tempos de flotação de 30, 45 e 60 min.

Para Q_L de 1800, 1600 e 800 $L.h^{-1}$ as eficiências obtidas para tempo de flotação de 15 min apresentaram diferença estatística significativa das eficiências para tempos de flotação de 30, 45 e 60 min. Já a eficiências obtidas para tempo de flotação de 30 min apresentaram diferença estatística significativa das eficiências para tempo de flotação de 60 min.

Para Q_L de 1400, 1100, 1000 e 300 $L.h^{-1}$ as eficiências obtidas para tempo de flotação de 15 min apresentaram diferença estatística significativa em relação as eficiências para tempos de flotação de 45 e 60 min.

Para Q_L de 700 $L.h^{-1}$ as eficiências obtidas para todos os tempos de flotação estudados não apresentaram diferença estatística significativa entre si.

Para Q_L de 600 $L.h^{-1}$ a eficiência obtida para tempo de flotação de 15 min apresentou diferença estatística significativa em relação as eficiências para tempos de flotação de 30, 45 e 60 min. Já a eficiência de separação obtida para tempo de flotação de 30 min apresentou diferença estatística significativa em relação as eficiências para tempos de flotação de 45 e 60 min.

Para Q_L de 500 e 400 $L.h^{-1}$ as eficiências obtidas para tempo de flotação de 15 min apenas apresentaram diferença estatística significativa da eficiência para tempo de flotação de 60 min.

É possível verificar pela análise estatística que as eficiências obtidas para tempo de flotação de 15 min, mostraram-se significativamente diferentes das eficiências para os outros tempos de flotação estudados para a maioria das vazões de reciclo de água residuária estudadas, da mesma forma que foi possível observar nos estudos com os tubos Venturi 1, 2 e 3.

5.1.5 Comparação entre os resultados obtidos pelos quatro tubos Venturi

Os tubos de Venturi apresentaram a mesma tendência na eficiência de separação de sólidos para todos os tempos de flotação, como é possível observar nas Figuras 5.17, 5.19, 5.21, 5.23.

De maneira geral o Venturi 3, apresentou os melhores resultados de eficiência de separação (%) para mesmo tempo de flotação e vazão de reciclo de água residuária e o Venturi 4 apresentou os menores valores, o que era esperado já que o Venturi 4 não possuía a pedra porosa responsável pela formação de menores bolhas de ar, que aderem-se mais facilmente aos flocos facilitando a separação por flotação.

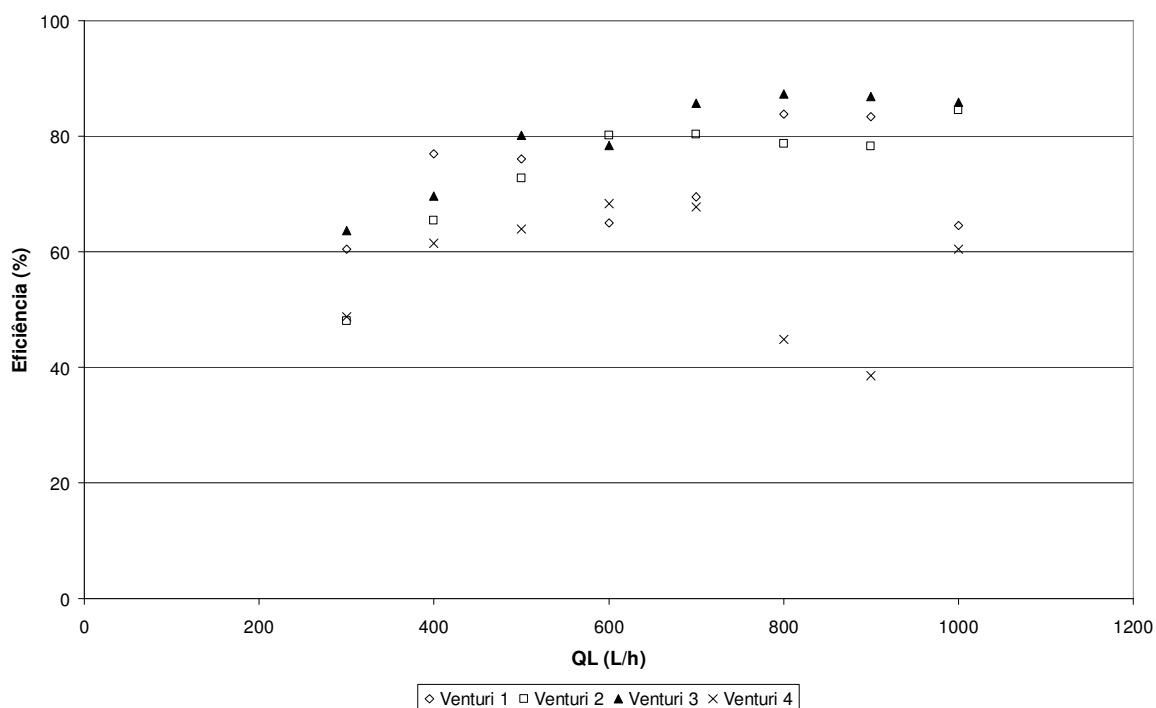


Figura 5.17 – Eficiência de separação de sólidos em função da vazão de reciclo de água residuária para os experimentos conduzidos com os quatro tubos Venturi estudados - tempo de flotação de 15 min.

Observa-se na Figura 5.18, que para Q_L de 1000 L.h^{-1} houve diferença significativa entre as eficiências de separação de sólidos obtidas pelo flotador utilizando os tubos Venturi 1, 2 e 3. Já entre o Venturi 1 e 4 não houve diferença significativa entre os resultados. Os resultados obtidos com os tubos Venturi 2 e 3 não apresentaram diferença relevante, mas apresentaram diferença significativa em relação ao Venturi 4.

Para as vazões de reciclo de água residuária de 900 e 800 L.h^{-1} os resultados obtidos com os tubos Venturi 1, 2 e 3 apresentaram diferença estatisticamente significativa em relação aos resultados do Venturi 4, enquanto que para as vazões de reciclo água residuária de 700 , 600 , 500 e 300 L.h^{-1} os

resultados obtidos pelos diferentes tubos Venturi não apresentaram diferença estatística significativa.

Para vazão de reciclo de água residuária de 400 L.h^{-1} os resultados apresentados pelo Venturi 1 apresentaram diferença significativa apenas dos resultados apresentados pelo Venturi 4.

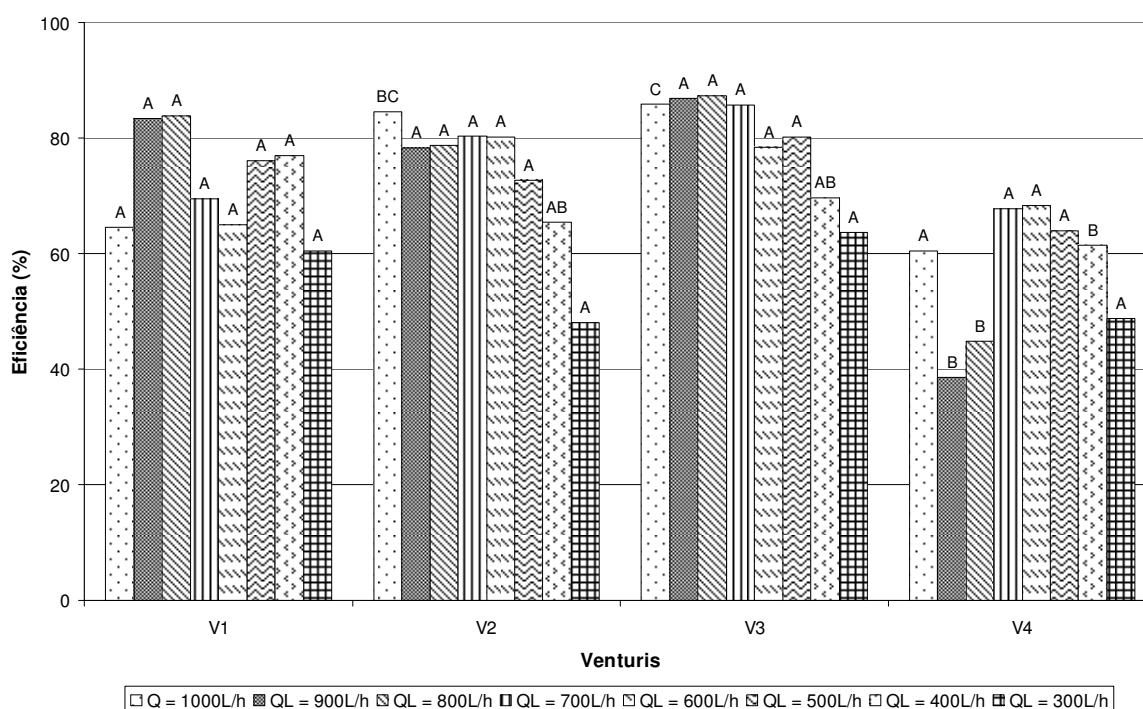


Figura 5.18 – Eficiência de separação de sólidos para os experimentos conduzidos com os quatro tubos Venturi estudados para diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L) para tempo de flotação de 15 min – Teste de Tukey.

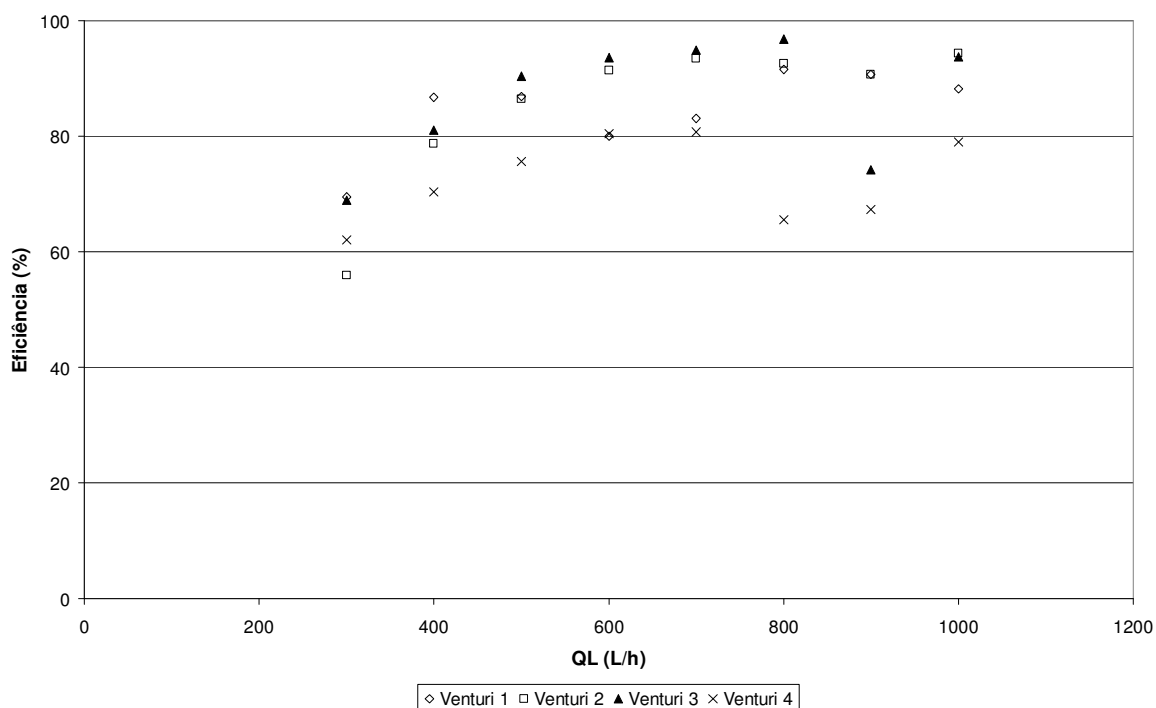


Figura 5.19 – Eficiência de separação de sólidos em função da vazão de água residuária para os experimentos conduzidos com os quatro tubos Venturi estudados - tempo de flotação de 30 min.

Observa-se na Figura 5.20 que para vazão de água residuária (Q_L) de 1000 $L.h^{-1}$ os resultados obtidos com os tubos Venturi 2 e 3 apresentaram diferença estatística significativa com os resultados do Venturi 4.

Para vazão de reciclo água residuária (Q_L) de 900, 700, 600 e 300 $L.h^{-1}$ não houve diferença estatística significativa entre os resultados apresentados pelos diferentes tubos Venturi.

Para vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 800 $L.h^{-1}$ os resultados obtidos com os tubos Venturi 1, 2 e 3 apresentaram diferença estatisticamente significativa dos resultados do Venturi 4.

Para vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 500 L.h^{-1} apenas os resultados obtidos pelo Venturi 3, apresentaram diferença estatisticamente significativa dos resultados do Venturi 4.

Para vazão de reciclo de água residuária de 400 L.h^{-1} os resultados obtidos com os tubos Venturi 1 e 3 apresentaram diferença estatisticamente significativa dos resultados do Venturi 4.

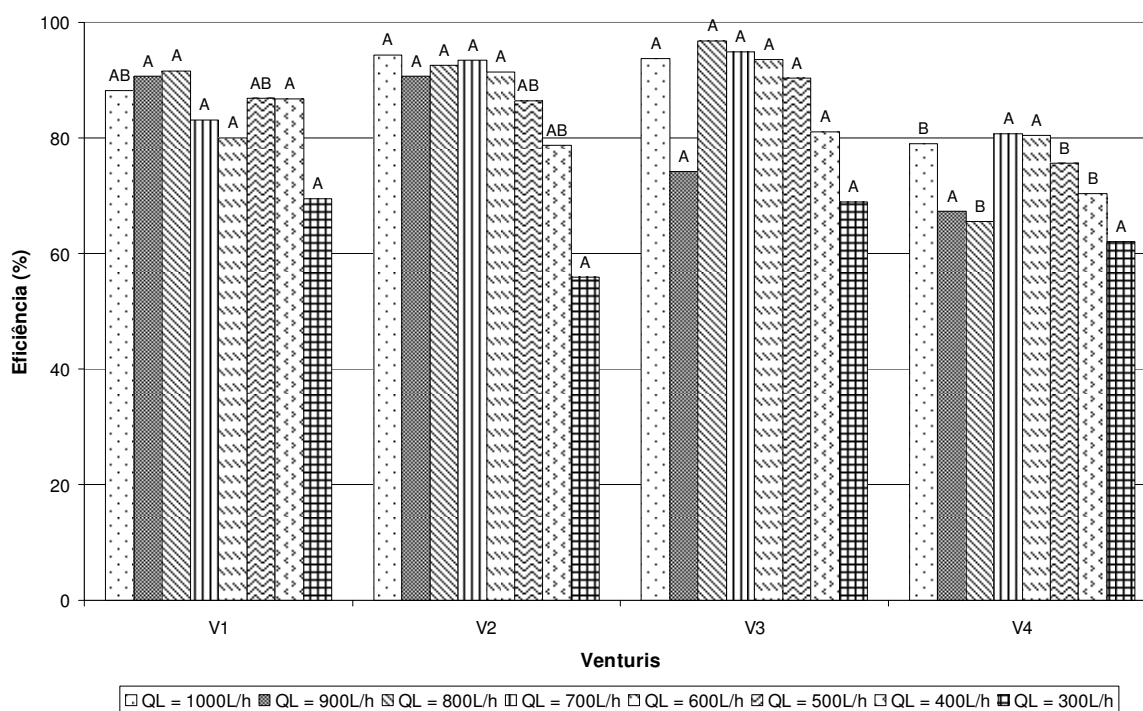


Figura 5.20 – Eficiência de separação de sólidos dos experimentos conduzidos com os quatro tubos Venturi estudados para diferentes vazões de água residuária (Q_L) e tempo de flotação de 30 min – Teste de Tukey (Letras maiúsculas: mesma vazão de reciclo de água residuária, diferentes tempos).

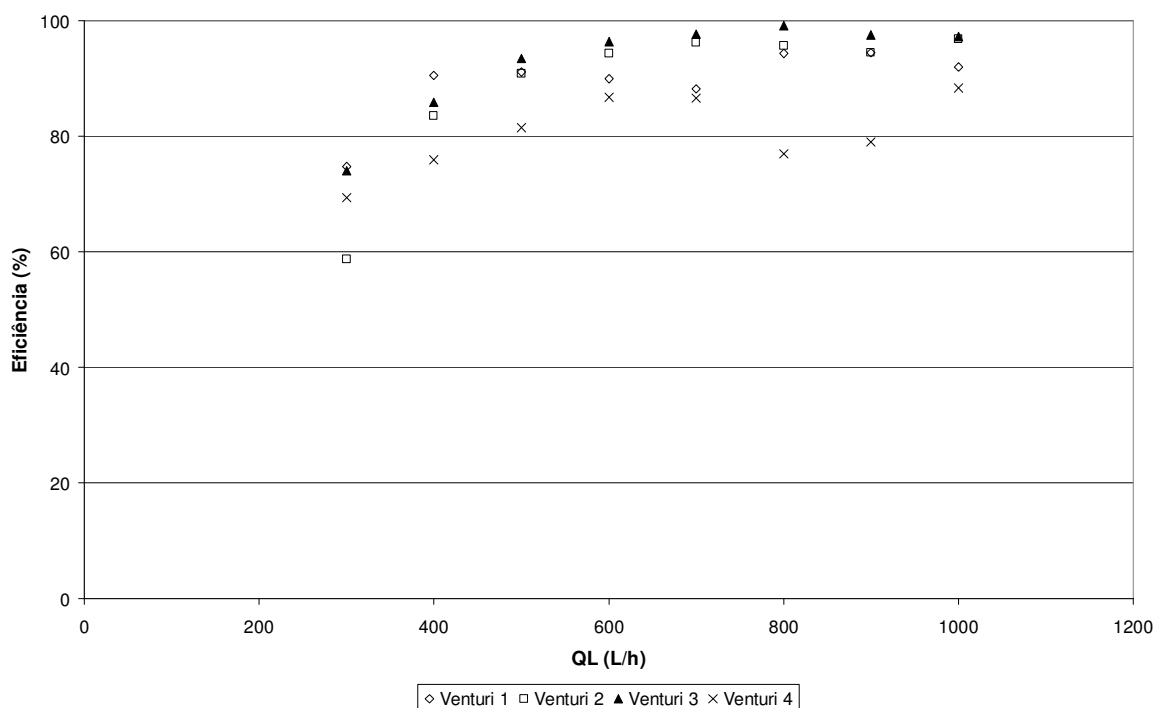


Figura 5.21 – Eficiência de separação de sólidos em função da vazão de reciclo de água residuária para os experimentos conduzidos com os quatro tubos Venturi estudados - tempo de flotação de 45 min.

Observa-se na Figura 5.22 que, para para vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 1000 L.h⁻¹, os resultados obtidos com os tubos Venturi 2 e 3 apresentaram diferença estatisticamente significativa com os resultados do Venturi 4.

Para vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 900, 800 e 400 L.h⁻¹ os resultados obtidos com os tubos Venturi 1, 2 e 3 apresentaram diferença estatisticamente significativa com os resultados do Venturi 4.

Para vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 700 e 300 L.h⁻¹ os resultados obtidos com os diferentes tubos Venturi não apresentaram diferença estatisticamente significativa entre si.

Para vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 600 e 500 $L.h^{-1}$, apenas os resultados obtidos com o Venturi 3 apresentaram diferença estatisticamente significativa com os resultados do Venturi 4.

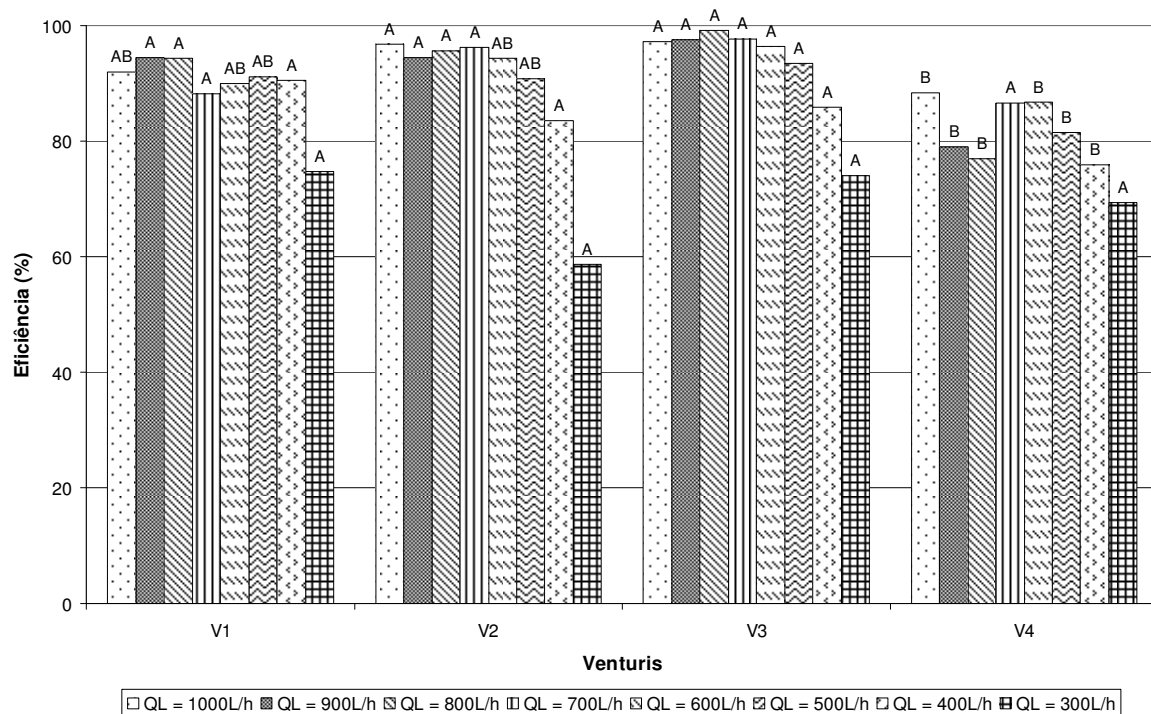


Figura 5.22 – Eficiência de separação de sólidos dos experimentos conduzidos com os quatro tubos Venturi para diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L) para tempo de flotação de 45 min – Teste de Tukey.

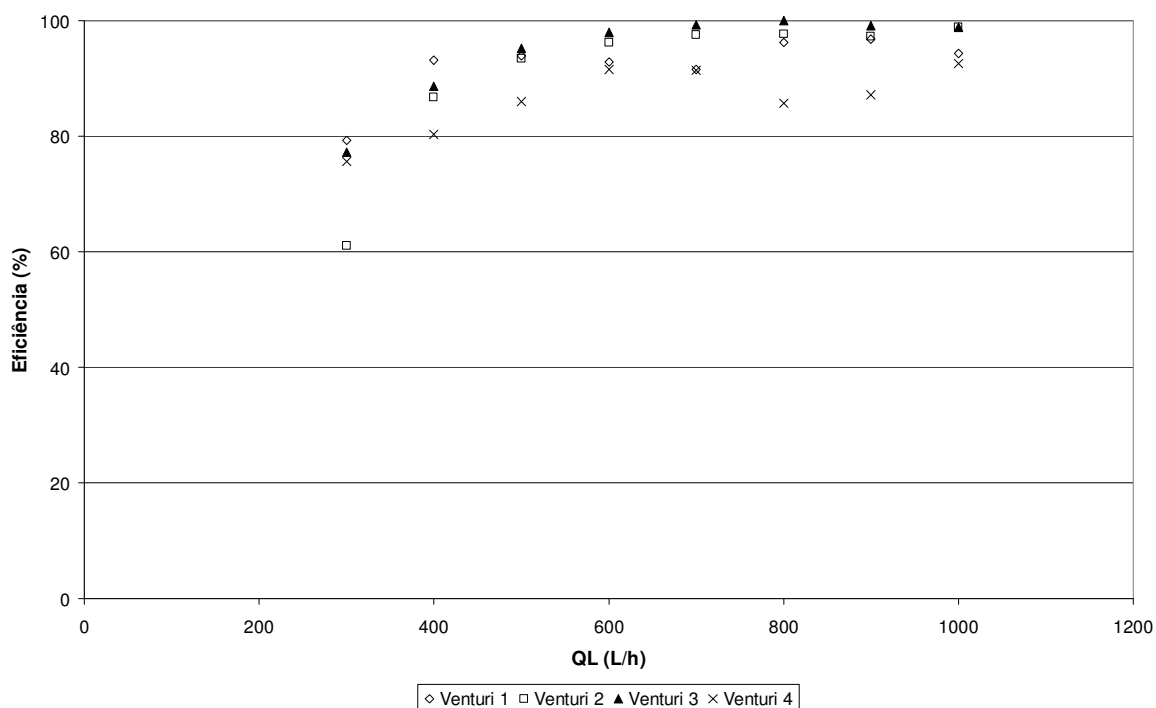


Figura 5.23 – Eficiência de separação de sólidos em função da vazão de reciclo de água residuária para os experimentos conduzidos com os quatro tubos Venturi estudados - tempo de flotação de 60 min.

Observa-se na Figura 5.24 que para vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 1000 e 700 $L.h^{-1}$ os resultados obtidos em relação aos diferentes tubos Venturi não apresentaram diferença estatística significativa.

Para vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 900 e 800 $L.h^{-1}$ os resultados obtidos com os tubos Venturi 1, 2 e 3 apresentaram diferença estatística significativa em relação aos resultados obtidos com o Venturi 4.

Para vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 600 e 500 $L.h^{-1}$ os resultados obtidos com o Venturi 3 apresentaram diferença estatística significativa em relação aos resultados obtidos com o Venturi 4.

Para vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 400 L.h^{-1} , os resultados obtidos com o Venturi 1 apresentaram diferença estatística significativa em relação aos resultados obtidos com os tubos Venturi 2 e 4. Já os resultados obtidos com os tubos Venturi 2 e 3 apresentaram diferença estatística significativa em relação aos resultados obtidos com o Venturi 4.

Para vazão de reciclo de água residuária de 300 L.h^{-1} , os resultados obtidos com o Venturi 1 apresentaram diferença estatística significativa em relação aos resultados obtidos com o Venturi 2 e estes resultados apresentaram diferença estatística significativa com os resultados obtidos com o Venturi 3.

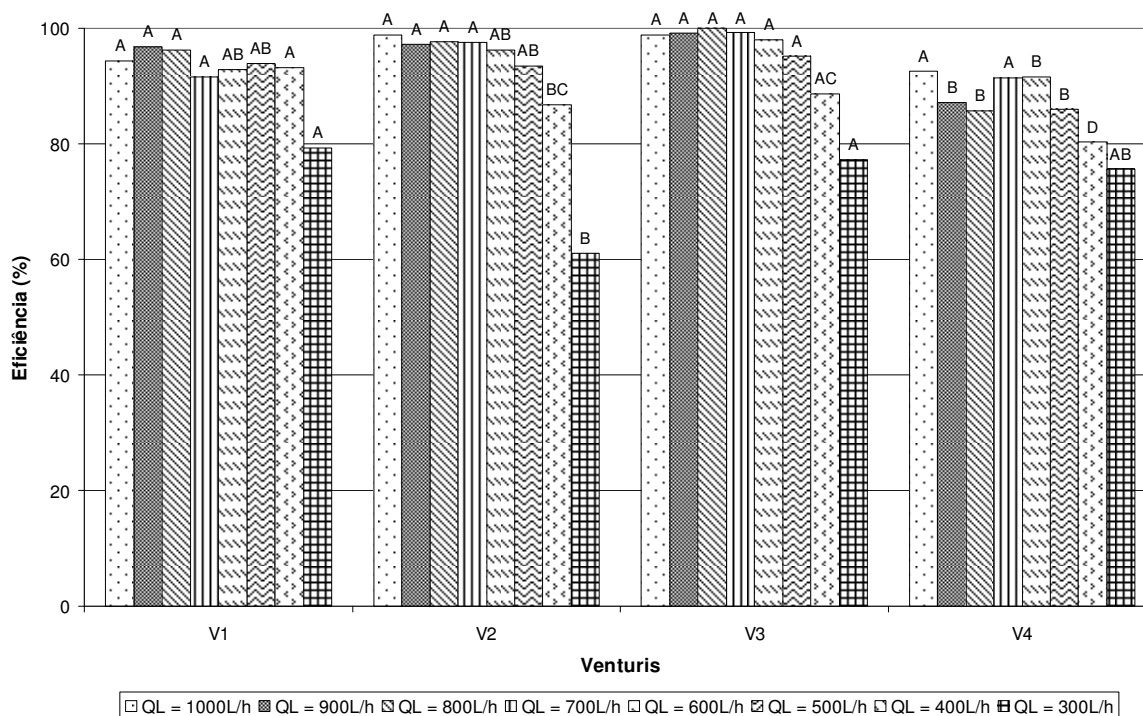


Figura 5.24 – Eficiência de separação de sólidos para os experimentos conduzidos com os quatro tubos Venturi estudados para diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L) para tempo de flotação de 60 min – Teste de Tukey.

Através das Figuras apresentadas e dos testes de Tukey realizados foi possível observar que o Venturi 4 apresentou os mais baixos valores de eficiência de separação de sólido para mesma vazão de água residuária (Q_L), enquanto que o Venturi 3 apresentou as maiores eficiências, o que era esperado já que imaginávamos que a pedra porosa na garganta do Venturi seria responsável pela maior produção de pequenas bolhas de ar que possuem maior facilidade para se aderirem aos flocos.

5.2 EXPERIMENTOS CONDUZIDOS EM SISTEMA CONTÍNUO

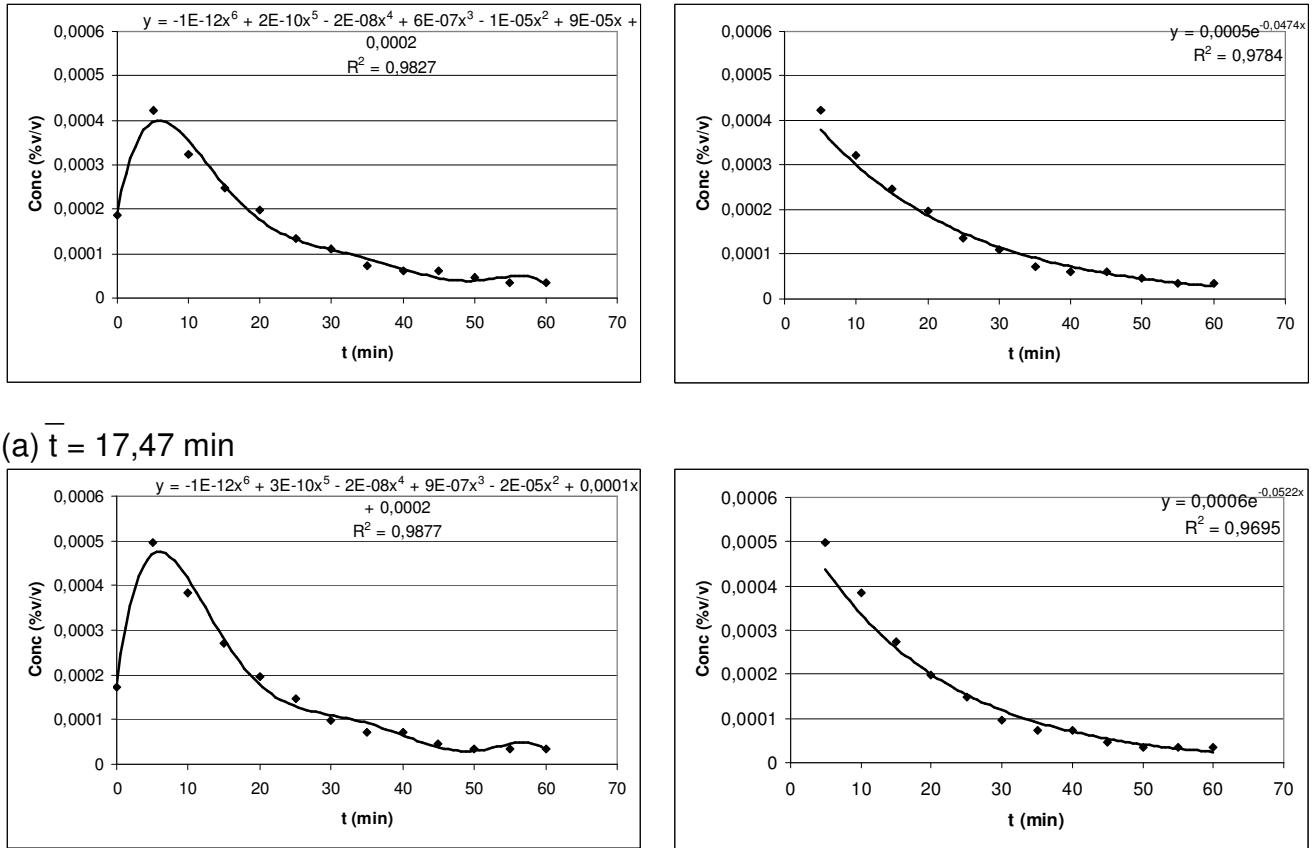
Os experimentos conduzidos em sistema contínuo no flotador foram feitos utilizando o Venturi 3, devido ao fato deste ter apresentado melhores resultados para os experimentos realizados em sistema descontínuo.

No item 5.2.1 estão apresentados os resultados dos testes feitos para determinação da distribuição do tempo de residência no flotador, operando de modo contínuo utilizando o Venturi 3.

No item 5.2.2 estão apresentados os resultados dos testes feitos no flotador operando em sistema contínuo com o Venturi 3 e no item 5.2.3 os resultados dos testes realizados utilizando o Venturi 4.

5.2.1 Distribuição de tempo de residência (DTR)

A Figura 5.25 apresenta a distribuição de tempo de residência (DTR) no flotador para tempo de detenção hidráulico (t_h) de 15 minutos. É possível observar que a partir de 45 minutos de funcionamento o flotador entrou em estado estacionário, ou seja, a concentração de azul de metileno na saída do flotador caía vagarosamente. Isto ocorreu tanto para vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 700 L.h^{-1} (a) quanto para Q_L de 1000 L.h^{-1} (b), equivalentes respectivamente a tempo médio de residência 17,47 e 16,61 minutos.

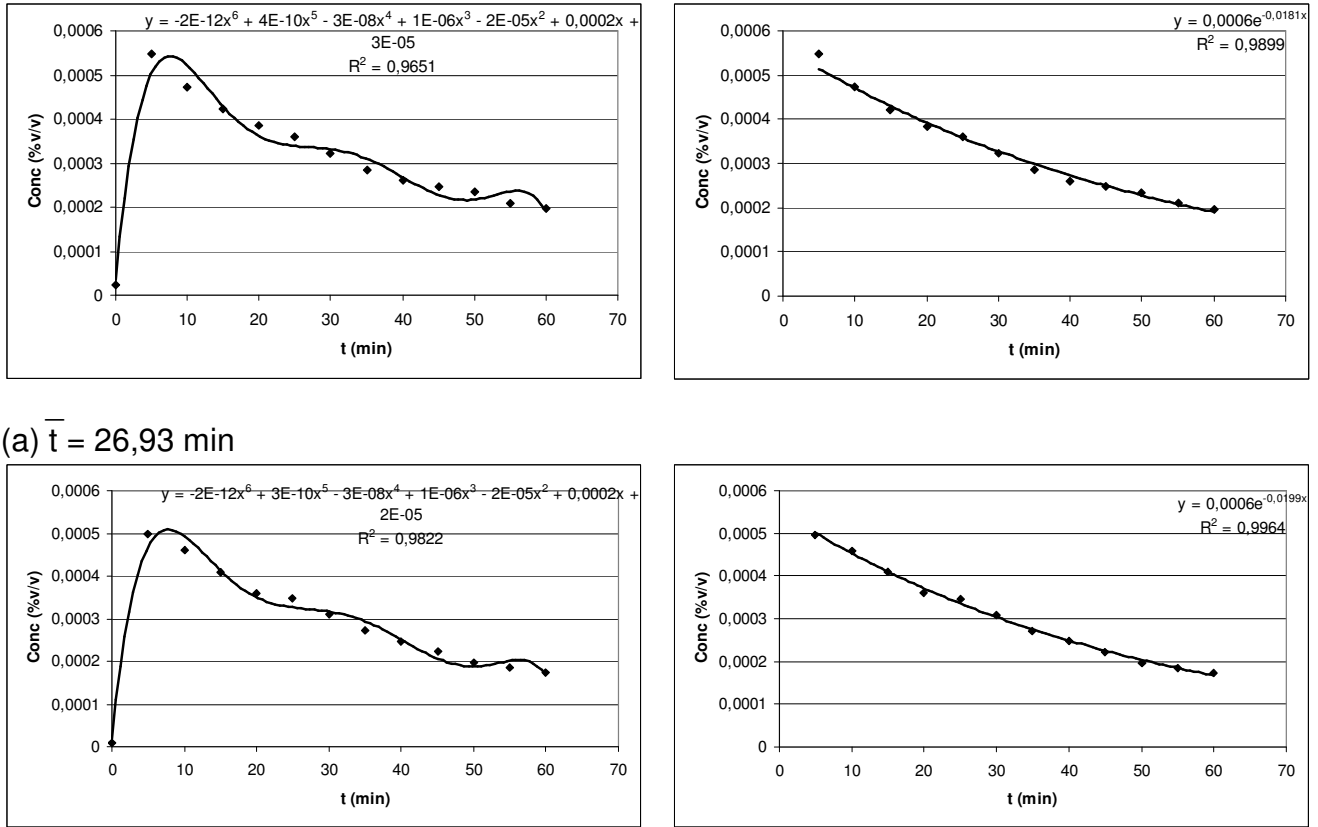


(a) $\bar{t} = 17,47$ min

(b) $\bar{t} = 16,61$ min

Figura 5.25 – Distribuição da concentração ao longo do tempo nas seguintes condições: (a) $t_h = 15$ min, $Q_{al} = 400$ L.h⁻¹, $Q_L = 700$ L.h⁻¹; (b) $t_h = 15$ min, $Q_{al} = 400$ L.h⁻¹, $Q_L = 1000$ L.h⁻¹.

Já a Figura 5.26 apresenta a distribuição de tempo de residência (DTR) no flotador para tempo de detenção hidráulico (t_h) de 60 minutos. Observa-se que a concentração de azul de metileno na saída do flotador ainda não tinha tornado-se muito baixa até a coleta da última amostra (60 min de funcionamento do equipamento), porém observa-se uma tendência para que isto ocorresse para as duas vazões de reciclo de água residuária estudadas, 700 L.h⁻¹ (a) e 1100 L.h⁻¹ (b), equivalentes respectivamente a tempo médio de residência de 26,93 e 26,61 minutos.



(b) $\bar{t} = 26,61$ min

Figura 5.26 – Distribuição da concentração ao longo do tempo nas seguintes condições: (a) $t_h = 60$ min, $Q_{al} = 100$ L.h⁻¹, $Q_L = 700$ L.h⁻¹; (b) $t_h = 60$ min, $Q_{al} = 100$ L.h⁻¹, $Q_L = 1000$ L.h⁻¹.

Observa-se ainda, nas Figuras 5.25 e 5.26, que para tempo de detenção hidráulico (t_h) de 15 minutos a concentração na saída do flotador atingiu menores valores em comparação a tempo de detenção hidráulico (t_h) de 60 min para o mesmo tempo de operação do flotador. Além disso, o flotador atingiu estado estacionário em menor tempo, cerca de 45 minutos, para tempo de detenção hidráulico (t_h) de 15 minutos enquanto que para tempo de detenção hidráulico (t_h) de 60 min o equipamento levaria maior tempo para entrar em estado estacionário.

Percebe-se então que, para menor tempo de detenção hidráulico (t_h) estudado, as partículas ficam menos tempo no flotador antes de serem removidas, já para maior tempo de detenção hidráulico (t_h) ocorre o inverso.

Os tempos médios de residência ($\bar{t}$) obtidos em cada situação são os indicados na parte inferior de cada parte da figura. Para garantir que o flotador tenha entrado em estado estacionário, recomenda-se que o tempo de operação do flotador seja superior a três vezes o tempo médio de residência ($3\bar{t}$), o que é possível observar na Figura 5.25. Desta forma para cada situação experimentada no flotador, operando de modo contínuo, tentou-se garantir este tempo de operação.

5.2.2 Experimentos conduzidos com o Venturi 3

A Figura 5.27 apresenta os resultados, de concentração e eficiência de separação de sólidos, dos experimentos realizados no flotador em sistema contínuo, para tempo de detenção hidráulico de 15 minutos ($Q_{al} = 400 \text{ L.h}^{-1}$) e vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 800 e 1100 L.h^{-1} , partes (a) e (b) respectivamente.

Na Figura 5.27 (a), observa-se que as concentrações de sólidos mantiveram-se praticamente constantes na saída do flotador em torno de $0,3 \text{ g.L}^{-1}$. A eficiência de separação de sólidos neste caso manteve-se entre 40 e 60%.

Na Figura 5.27 (b) observa-se que as concentrações de sólidos na saída do flotador apresentaram maior variação, entre $0,3$ e $0,6 \text{ g.L}^{-1}$, bem como a eficiência de separação de sólidos, que variou entre 10 e 50%.

É possível constatar que para tempo de detenção hidráulico de 15 minutos foram obtidos melhores resultados para vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 800 L.h^{-1} , provavelmente devido a maior aspiração de ar pelo Venturi nesta

condição que atingiu 60 L.h^{-1} , enquanto que para 1100 L.h^{-1} de vazão de reciclo de água residuária, a vazão de ar ficou em aproximadamente 36 L.h^{-1} . Observa-se que a concentração de sólidos na saída do flotador apresentou certa variação.

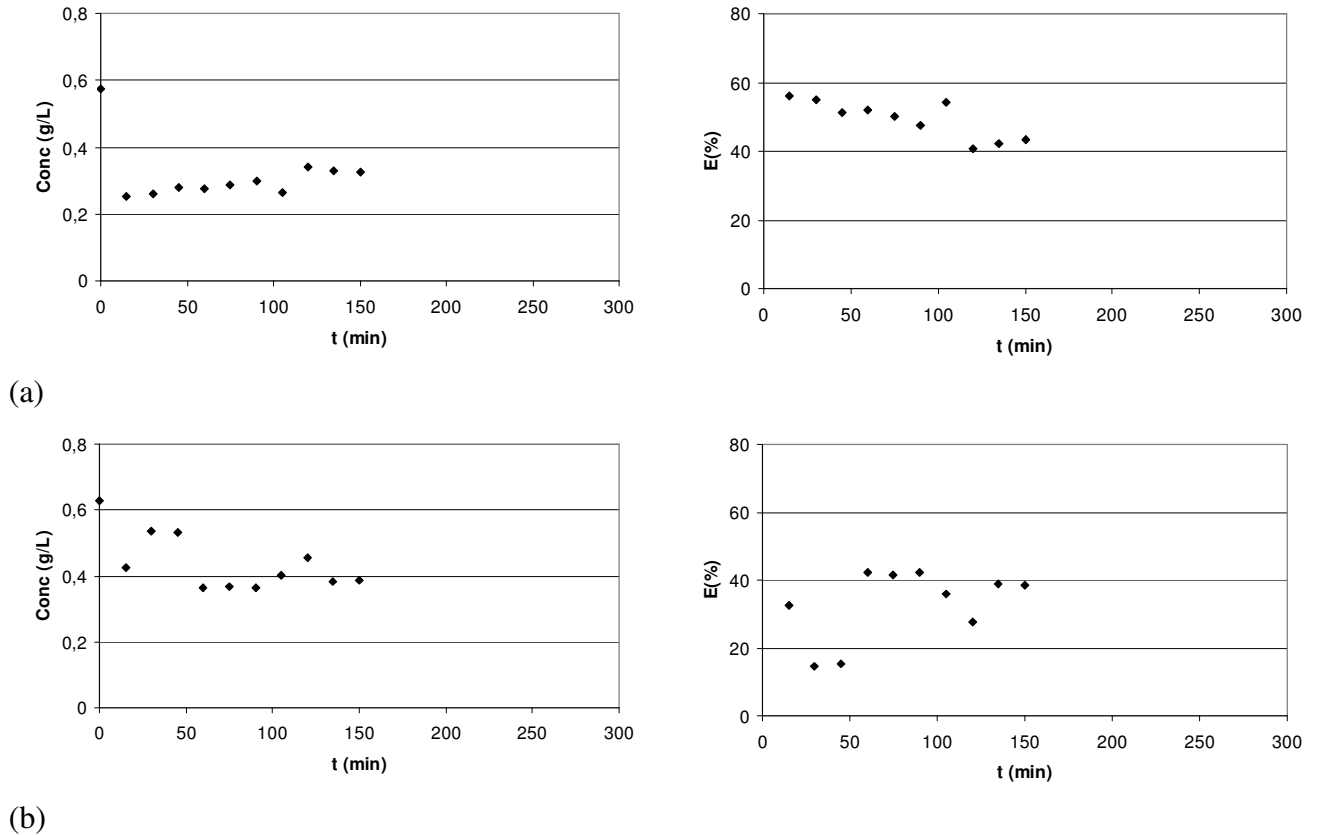


Figura 5.27 – Concentração e eficiência de separação de sólidos no flotador operando em sistema contínuo nas seguintes condições: (a) $t_h = 15 \text{ min}$, $Q_{al} = 400 \text{ L.h}^{-1}$, $Q_L = 800 \text{ L.h}^{-1}$; (b) $t_h = 15 \text{ min}$, $Q_{al} = 400 \text{ L.h}^{-1}$, $Q_L = 1100 \text{ L.h}^{-1}$.

A Figura 5.28 apresenta os resultados de concentração e eficiência de separação de sólidos dos experimentos realizados no flotador em sistema contínuo para tempo de detenção hidráulico (t_h) de 30 minutos ($Q_{al} = 200 \text{ L.h}^{-1}$) e

vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 800 e 1100 L.h⁻¹, partes (a) e (b), respectivamente.

Observa-se na Figura 5.28 (a) que as concentrações de sólidos mantiveram-se praticamente constantes na saída do flotador, entre 0,2 e 0,3 g.L⁻¹, e que as eficiências de separação de sólidos apresentaram valores entre 50 e 70%.

Já na Figura 5.28 (b) observa-se maior variação na concentração de sólidos na saída do flotador, entre 0,1 e 0,6 g.L⁻¹, bem como maior variação na eficiência de separação de sólidos que apresentou valores entre 10 e 80%.

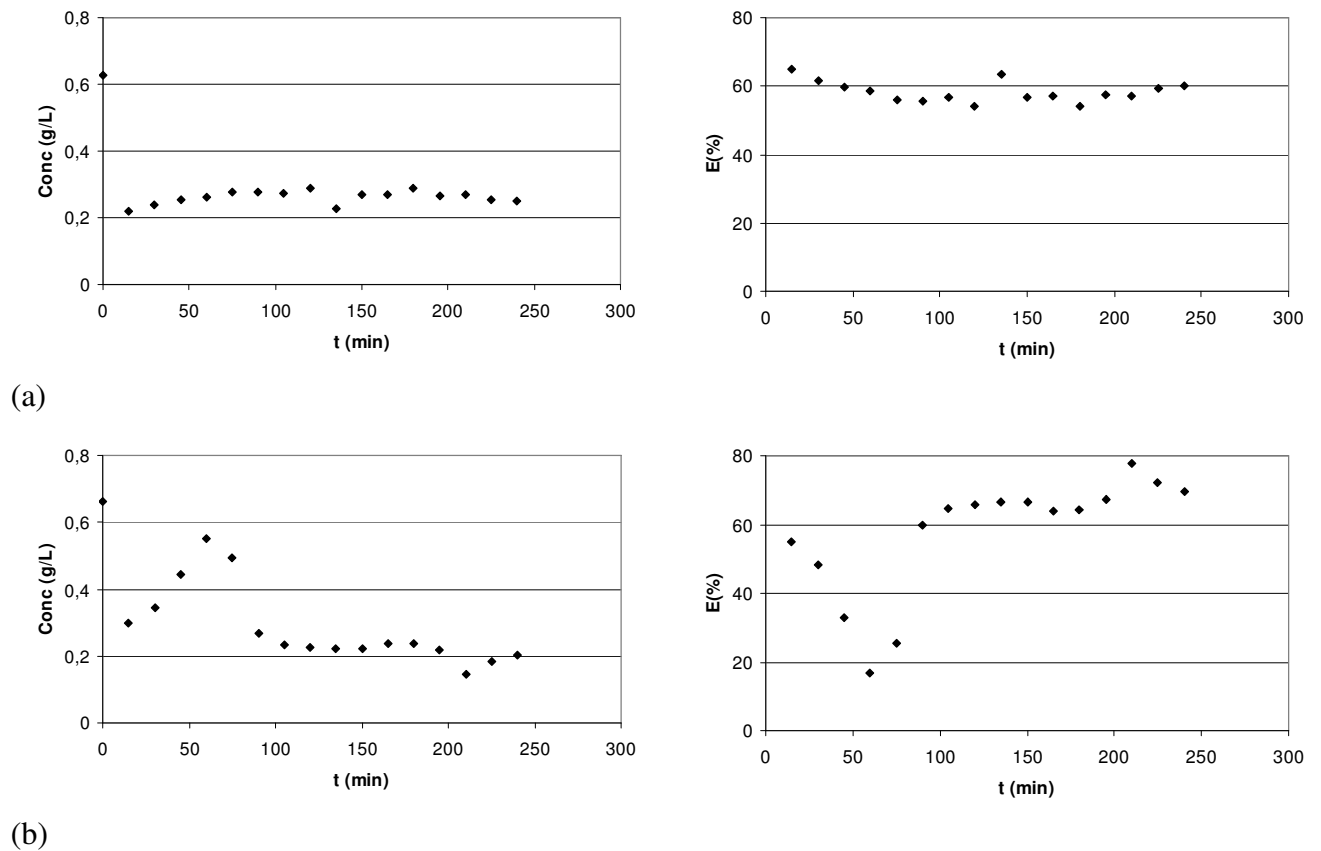


Figura 5.28 – Concentração e eficiência de separação de sólidos no flotador operando em sistema contínuo nas seguintes condições: (a) $t_h = 30$ min, $Q_{al} = 200$ L.h⁻¹, $Q_L = 800$ L.h⁻¹; (b) $t_h = 30$ min, $Q_{al} = 200$ L.h⁻¹, $Q_L = 1100$ L.h⁻¹.

As vazões de ar obtidas nestes experimentos foram 176 L.h^{-1} para vazão de reciclo de água residuária de 800 L.h^{-1} e 60 L.h^{-1} para Q_L de 1100 L.h^{-1} .

A Figura 5.29 apresenta os resultados de concentração e eficiência de separação de sólidos dos experimentos realizados no flotador em sistema contínuo para tempo de detenção hidráulico (t_h) de 60 minutos ($Q_{al} = 200 \text{ L.h}^{-1}$) e vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 800 e 1100 L.h^{-1} , partes (a) e (b), respectivamente.

Observa-se na Figura 5.29 (a) que as concentrações de sólidos mantiveram-se praticamente constantes na saída do flotador até 150 minutos de funcionamento do equipamento, aproximadamente $0,1 \text{ g.L}^{-1}$, e depois subiram até aproximadamente $0,3 \text{ g.L}^{-1}$. Desta forma as eficiências de separação de sólidos apresentaram valores próximos a 50% até 150 minutos de funcionamento do flotador e depois começou a haver diminuição destes valores até um ponto em que não mais ocorreu separação de sólidos no equipamento para tempo de funcionamento do flotador próximo a 300 min.

Já na Figura 5.29 (b) observa-se menor variação na concentração de sólidos na saída do flotador, entre $0,1$ e $0,2 \text{ g.L}^{-1}$, bem como menor variação na eficiência de separação de sólidos do flotador que apresentou valores entre 60 e 70%.

Para Q_L de 800 L.h^{-1} foi alcançada Q_{ar} de 176 L.h^{-1} , já para Q_L de 1100 L.h^{-1} foi alcançada Q_{ar} de 64 L.h^{-1} .

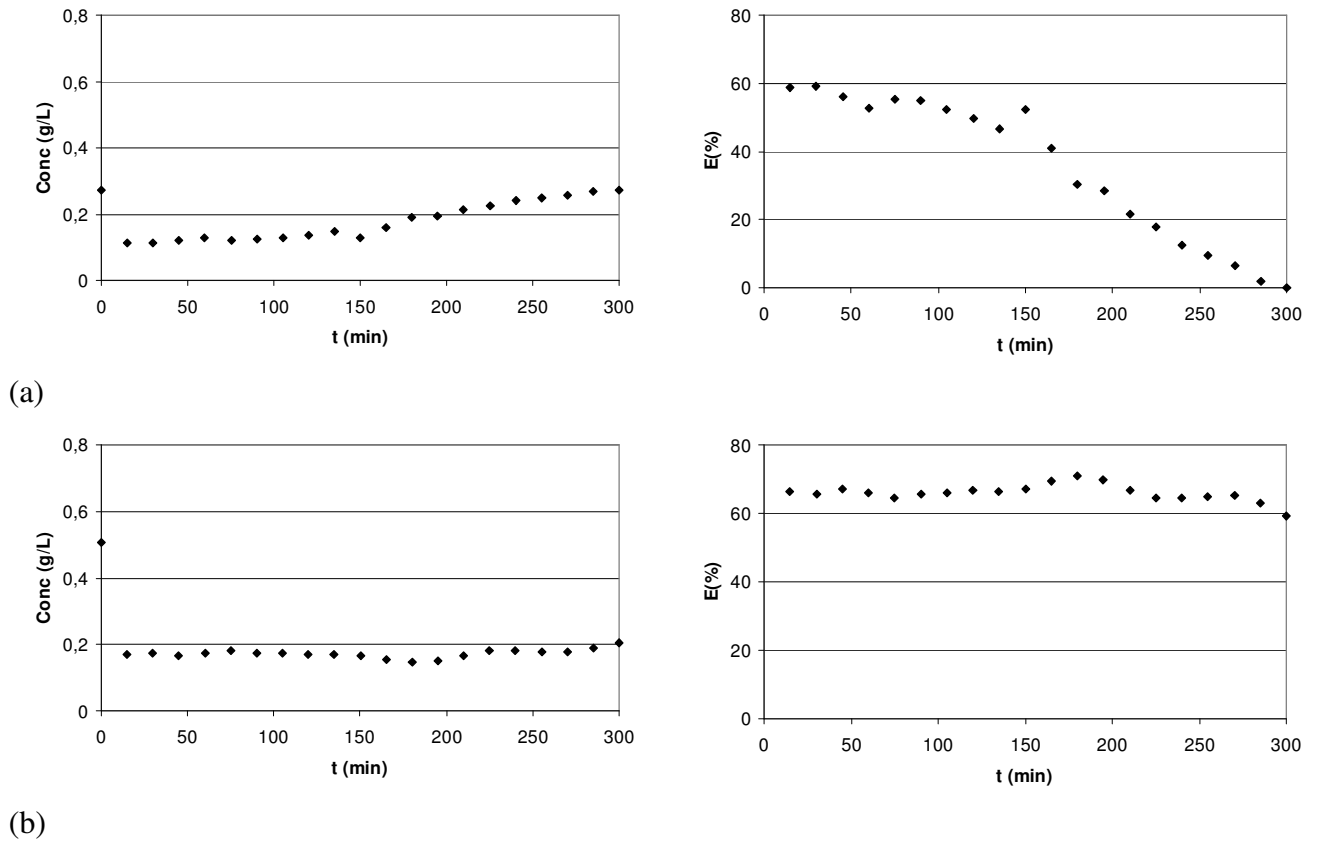


Figura 5.29 – Concentração e eficiência de separação de sólidos no flotador operando em sistema contínuo nas seguintes condições: (a) $t_h = 60$ min, $Q_{al} = 100$ L.h⁻¹, $Q_L = 800$ L.h⁻¹; (b) $t_h = 60$ min, $Q_{al} = 100$ L.h⁻¹, $Q_L = 1100$ L.h⁻¹.

5.2.3 Experimentos conduzidos com o Venturi 4

Na Figura 5.30, para tempo de detenção hidráulico (t_h) de 15 minutos, observa-se praticamente a mesma tendência tanto em relação as concentrações de sólidos na saída do flotador, quanto em relação as eficiências de separação de sólidos. Observa-se na Figura 5.30 (a) que as concentrações de sólidos na saída do flotador mantiveram-se entre 0,3 e 0,4 g.L⁻¹, enquanto que a eficiência de separação de sólidos manteve-se em aproximadamente 50%. Já na Figura 5.30 (b) observa-se que as concentrações de sólidos na saída do flotador mantiveram-se entre 0,2 e 0,3 g.L⁻¹ e as eficiências de separação de sólidos mantiveram-se em torno de 60%.

O que diferencia a Figura 5.30 (a) e (b) é a vazão de reciclo de água residuária aplicada em cada caso, 800 e 1900 L.h⁻¹, respectivamente, correspondendo a vazão de ar aspirado pelo Venturi de 384 e 320 L.h⁻¹. Neste caso foi alcançada maior eficiência de separação de sólidos para menor Q_{ar}, o que indica a formação de bolhas de ar menores e provavelmente maior concentração de bolhas de ar.

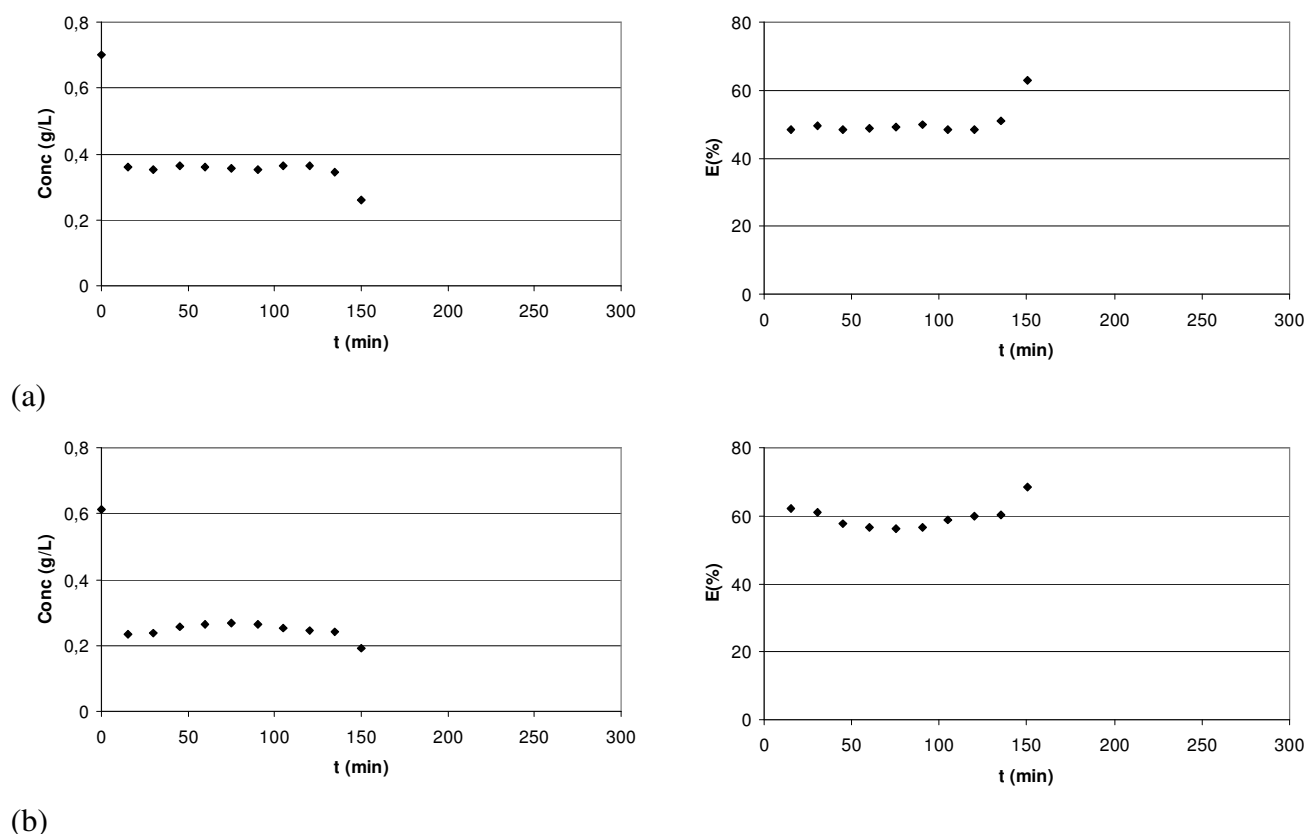


Figura 5.30 – Concentração e eficiência de separação de sólidos no flotor operando em sistema contínuo sem a pedra porosa para: (a) $t_h = 15$ min, $Q_{al} = 400$ L.h⁻¹, $Q_L = 800$ L.h⁻¹; (b) $t_h = 15$ min, $Q_{al} = 400$ L.h⁻¹, $Q_L = 1900$ L.h⁻¹.

Na Figura 5.31, para tempo de detenção hidráulico (t_h) de 30 minutos, observa-se na parte (a) que as concentrações de sólidos na saída do flotador mantiveram-se praticamente constantes entre 0,1 e 0,2 g.L⁻¹ enquanto que a

eficiência de separação de sólidos manteve-se em aproximadamente 70%. Já na Figura 5.31 (b) observa-se que as concentrações de sólidos na saída do flotador mantiveram-se entre 0,2 e 0,4 g.L⁻¹ porém aumentaram com o decorrer do tempo o que implicou em valores iniciais de eficiência de separação de sólidos em torno de 70%, porém estas eficiências diminuíram com o tempo de operação do equipamento alcançando valores menores que 50%.

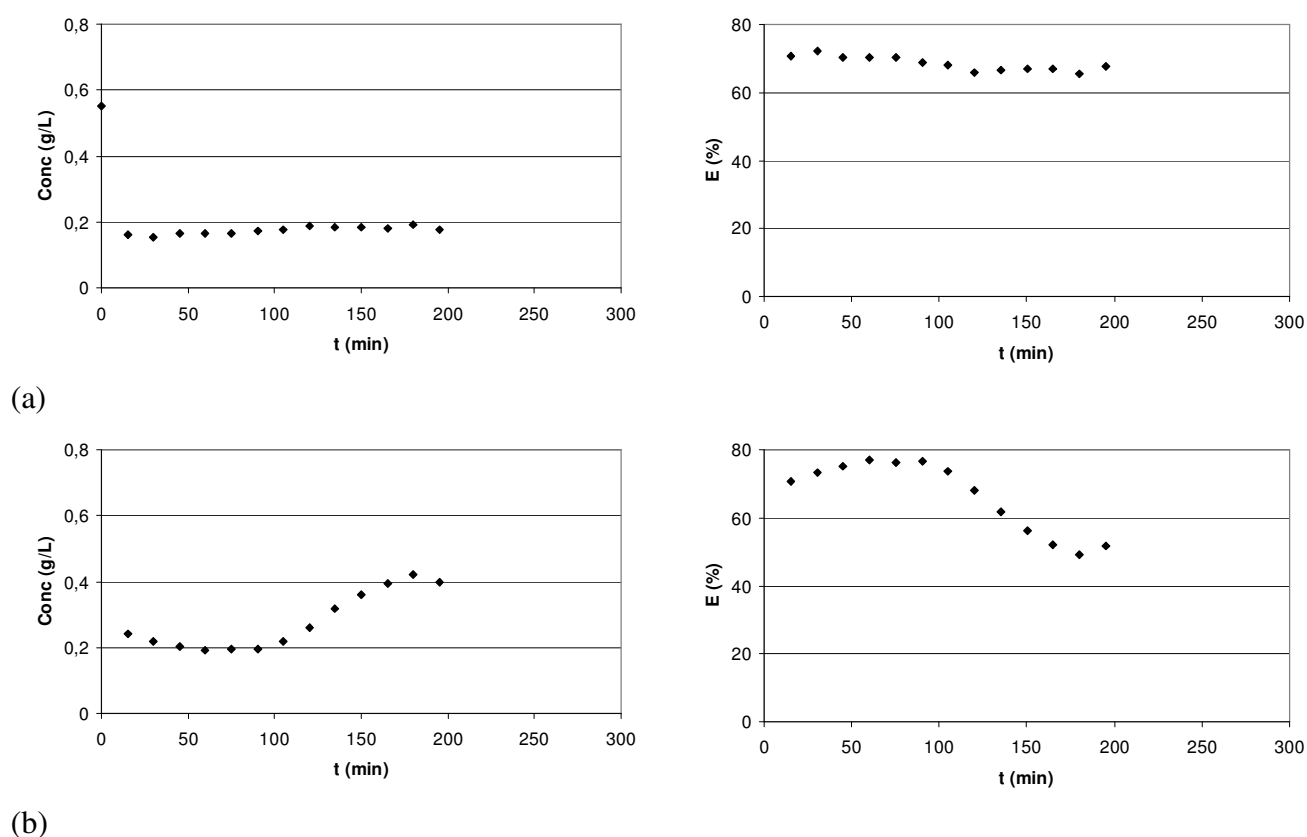


Figura 5.31 – Concentração e eficiência de separação de sólidos no flotador operando em sistema contínuo sem a pedra porosa para: (a) $t_h = 30$ min, $Q_{al} = 200$ L.h⁻¹, $Q_L = 800$ L.h⁻¹; (b) $t_h = 30$ min, $Q_{al} = 200$ L.h⁻¹, $Q_L = 1900$ L.h⁻¹.

O que diferencia a Figura 5.31 (a) e (b) é a vazão de reciclo de água residuária aplicada em cada caso, 800 e 1900 L.h⁻¹, respectivamente, correspondendo a vazão de ar aspirado pelo Venturi de 400 e 320 L.h⁻¹. Neste

caso foi alcançada maior eficiência de separação de sólidos para menor valor de Q_{ar} , o que indica a formação de bolhas de ar menores e provavelmente maior concentração de bolhas de ar.

Na Figura 5.32, para tempo de detenção hidráulico (t_h) de 60 minutos e vazão de reciclo de água residuária de 800 L.h^{-1} , observa-se que as concentrações de sólidos na saída do flotador oscilaram entre $0,3$ e $0,4 \text{ g.L}^{-1}$, enquanto que a eficiência de separação de sólidos manteve-se em entre 40 e 60% . A vazão de ar aspirado pelo Venturi ficou em 320 L.h^{-1} .

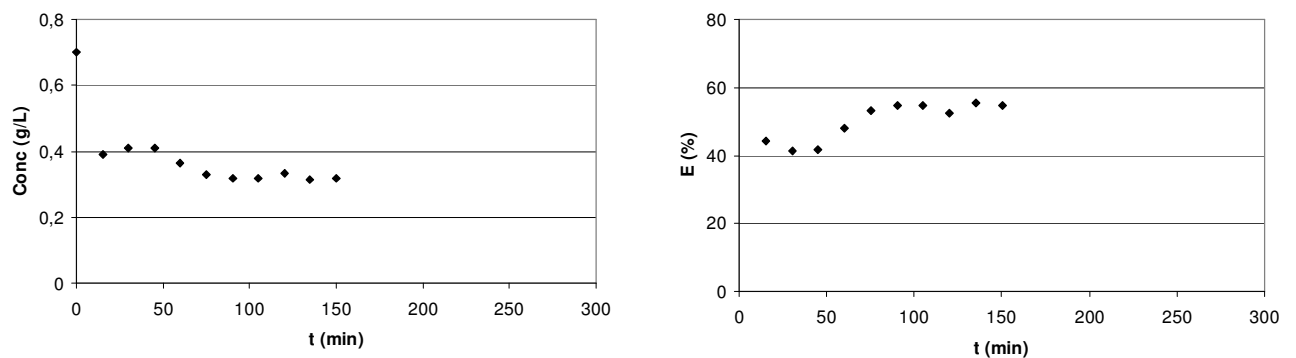


Figura 5.32 – Concentração e eficiência de separação de sólidos no flotador operando em sistema contínuo sem a pedra porosa para: $t_h = 60 \text{ min}$, $Q_{al} = 100 \text{ L.h}^{-1}$, $Q_L = 800 \text{ L.h}^{-1}$.

5.2.4 Experimentos conduzidos com o Venturi 3 e insuflação de ar

A Figura 5.33 apresenta os resultados obtidos dos testes realizados utilizando mini-compressores para aumentar a vazão de ar no Venturi.

Observa-se que para Q_L de 800 L.h^{-1} , conseqüente Q_{ar} de 304 L.h^{-1} , foi possível obter concentrações de sólidos na saída do flotador entre $0,2$ e $0,3 \text{ g.L}^{-1}$ e eficiências de separação de sólidos em torno de 60% . Já para Q_L de 1100 L.h^{-1} , equivalente a Q_{ar} de 384 L.h^{-1} , foram obtidas concentrações de sólidos na saída

do flotador de aproximadamente $0,2 \text{ g.L}^{-1}$ e eficiências de separação de sólidos entre 60 e 70%. Neste caso verificou-se que o aumento da vazão de ar, não aumentou significativamente as eficiências de separação de sólidos.

Os resultados, obtidos através da insuflação de ar, não diferiram muito dos resultados obtidos com a pedra porosa, sem insuflação de ar para o mesmo tempo de detenção hidráulico (t_h).

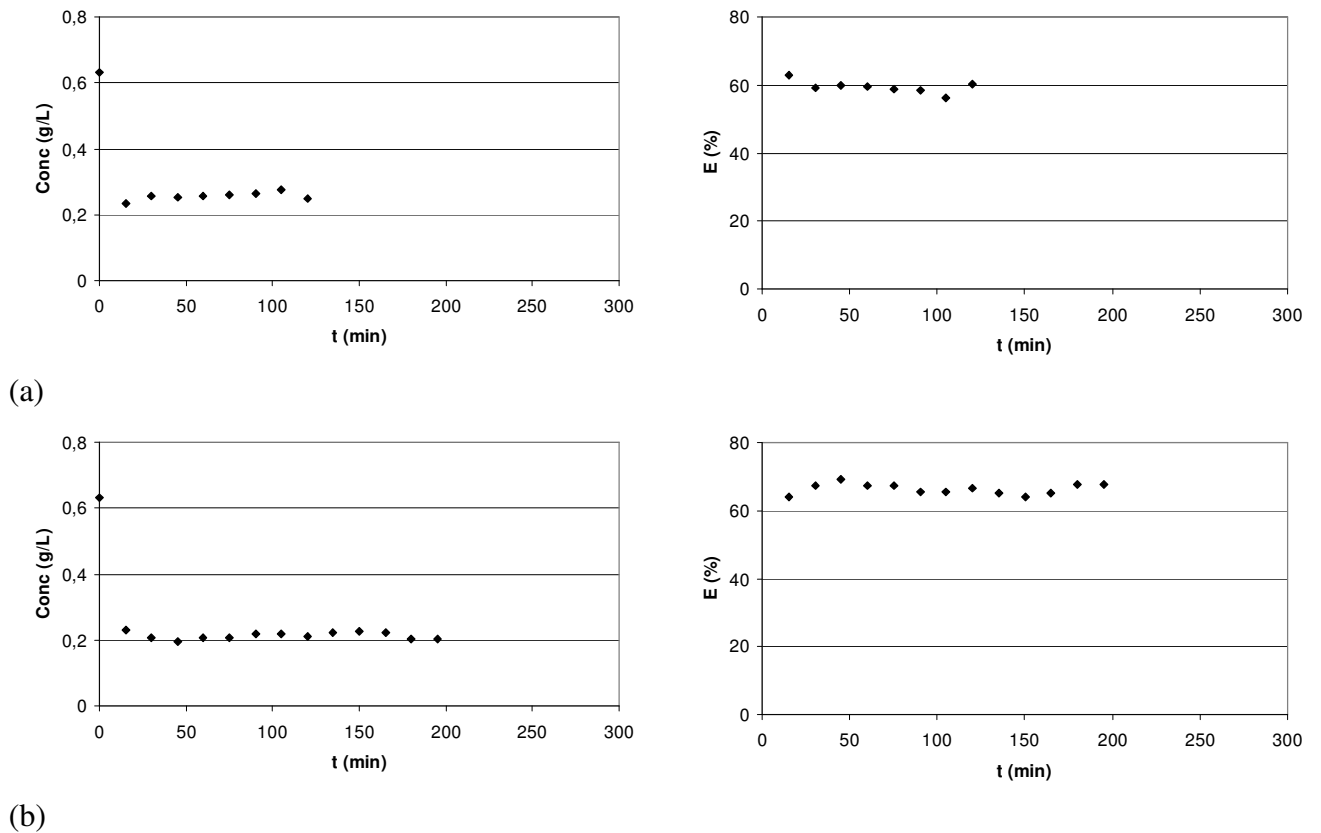


Figura 5.33 – Concentração e eficiência de separação de sólidos no flotador operando em sistema contínuo com a pedra porosa e insuflação de ar por bombas de “aquário” para: (a) $t_h = 30 \text{ min}$, $Q_{al} = 200 \text{ L.h}^{-1}$, $Q_L = 800 \text{ L.h}^{-1}$; (b) $t_h = 30 \text{ min}$, $Q_{al} = 200 \text{ L.h}^{-1}$, $Q_L = 1100 \text{ L.h}^{-1}$.

5.2.5 Tensão Superficial

A tensão superficial da água residuária, bruta e após a flotação, foi calculada de acordo com a lei de Tate descrita em Gonçalves (1968).

Os valores de tensão superficial variaram entre 60 e $80 \times 10^{-3} \text{ N.m}^{-1}$. Estes resultados mostraram que a tensão superficial da água residuária estudada apresentou valores próximos a tensão superficial da água a 20°C ($72,8 \times 10^{-3} \text{ N.m}^{-1}$) encontrado em Perry (1984).

5.3 APLICAÇÃO DE BALANÇO DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO NO VENTURI

Foi feito um balanço de quantidade de movimento no Venturi estudado com os seguintes para determinação da pressão teórica na garganta do mesmo tendo como objetivos:

- Verificar se a pressão encontrada na garganta do Venturi realmente apresenta valores menores que a pressão atmosférica, promovendo a aspiração de ar para diferentes vazões de reciclo de água residuária (Q_L).
- Descobrir a quantidade de ar aspirada pelo Venturi.
- Explicar a queda de Q_{ar} para valores muito altos de Q_L , ou seja, a sucção de ar pelo Venturi em função de Q_L passa por uma faixa de máximo.

Inicialmente foram feitas as seguintes considerações:

- O volume de controle não inclui as paredes do Venturi e nem as paredes do tubo de sucção de ar, logo não há atrito do líquido com as paredes metálicas.
- O tubo de sucção de ar é suficientemente curto, podendo a pressão em seu interior ser considerada igual a pressão ambiente local (pressão atmosférica).
- O Venturi foi dividido em quatro partes: cone de entrada, garganta, cone de saída e tubo de sucção de ar, conforme representado na Figura 5.34.

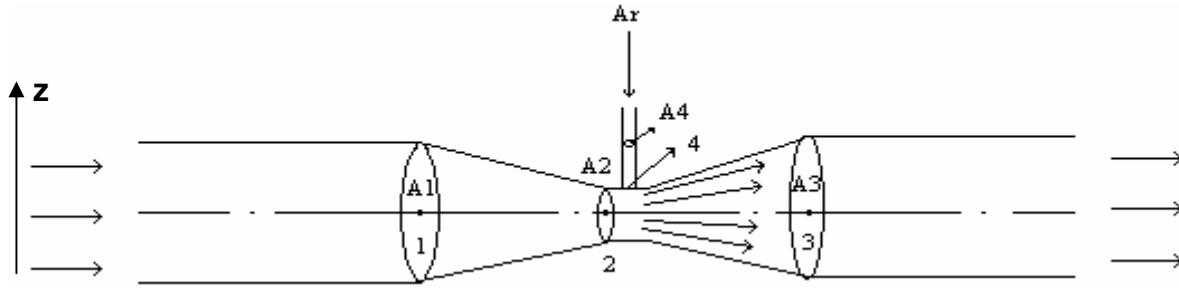


Figura 5.34 – Representação do Venturi subdividido em 4 secções: cone de entrada (1), garganta (2), cone de saída (3), tubo de sucção de ar (4).

Considerando-se apenas o cone de entrada e aplicando-se a equação de Bernoulli:

$$\frac{\Delta \bar{u}^{-2}}{2} + g\Delta z + \frac{\Delta P}{\rho} = 0 \quad (5.1)$$

na qual $\Delta z = 0$ quando considera-se o Venturi horizontal. Então, obtém-se:

$$\frac{\Delta \bar{u}^{-2}}{2} + \frac{\Delta P}{\rho} = 0 \quad (5.2)$$

sabe-se que:

$$w = \rho \bar{u}_1 A_1 = \rho \bar{u}_2 A_2 \quad (5.3)$$

isolando-se $\bar{u}_2$, e substituindo-se A_1 e A_2 em função de D_1 e D_2 tem-se:

$$\bar{u}_2 = \frac{\bar{u}_1 A_1}{A_2} = \frac{\bar{u}_1 D_1^2}{D_2^2} \quad (5.4)$$

sendo $D_1 = 4D_2$, tem-se:

$$\bar{u}_2 = 16\bar{u}_1 \quad (5.5)$$

então:

$$\frac{\Delta \bar{u}^{-2}}{2} = \frac{1}{2} \left[\left(16\bar{u}_1 \right)^2 - \left(\bar{u}_1 \right)^2 \right] \quad (5.6)$$

que é igual a:

$$\frac{\Delta \bar{u}^{-2}}{2} = 127,5 \bar{u}_1^2 \quad (5.7)$$

sabe-se ainda que:

$$\bar{u}_1 = \frac{\dot{V}}{A_1} \quad (5.8)$$

Utilizando-se a equação (5.8) para uma dada vazão ($\dot{V}$) e calculando-se a área da seção 1 do Venturi (A_1) é possível determinar $\bar{u}_1$.

A partir de $\bar{u}_1$ é possível determinar-se $\bar{u}_2$ a partir da equação (5.5).

Tendo-se os valores de $\bar{u}_1$ e $\bar{u}_2$ é possível determinar-se o valor da pressão na garganta do Venturi a partir da equação (5.2) e do valor da pressão na seção 1 (P_1) obtido experimentalmente.

Considerando-se o volume de controle do ponto 4 e a garganta do Venturi e desconsiderando-se a perda de carga na pedra porosa e nas paredes do tubo de sucção de ar e aplicando-se o balanço de quantidade de movimento.

$$\Delta \left(w' \bar{u}_y' \right) + \frac{\partial P}{\partial \theta} = R_y + F_{yp} + F_{yd} + F_{yg} \quad (5.9)$$

no qual $\frac{\partial P}{\partial \theta} = 0$, quando considera-se estado estacionário; resultante das forças $R_y = 0$, quando considera-se que o volume de controle não inclui as paredes; força de atrito $F_{yd} = 0$, quando considera-se o atrito entre o líquido e as paredes desprezível; força gravitacional $F_{yg} = 0$, quando considera-se a densidade do ar muito baixa. Logo tem-se:

$$\Delta \left(w' \bar{u}_y' \right) = F_{yp} \quad (5.10)$$

na qual:

w' = vazão mássica do ar

$\bar{u}'$ = velocidade média do ar

Considerando-se $w' = \rho \bar{u}' A$ e que o ar comporta-se como gás ideal, logo $PV = nRT$ e que como as paredes do tubo de sucção não fazem parte do volume de controle (VC), a força F_{yp} é causada pela diferença de pressão no VC, tem-se:

$$\frac{P_4 M}{RT} A_o \bar{u}_4'^2 = A_o (P_a - P_4) \quad (5.11)$$

na qual, A_o = área do orifício de sucção de ar, P_a = pressão ambiente e P_4 = pressão na garganta do Venturi.

Desta maneira, é possível obter $\bar{u}'_4$ e conseqüentemente a vazão de ar ($\dot{V}_{ar}$).

Foi feito outro balanço de quantidade de movimento para determinar por que a vazão de ar diminui quando Q_L aumenta muito, ou seja, considerando-se que não há aspiração de ar quanto vale P_2 .

Considerando-se ainda que o volume de controle vai do ponto 2 ao ponto 3 e que não inclui as paredes, $R_x = 0$.

$$\Delta(\bar{w}u_x) = F_{xp} \quad (5.12)$$

Aplicando-se o balanço de energia mecânica no volume de controle considerado tem-se:

$$\frac{\Delta \bar{u}^2}{2} + g\Delta z + \int_{P_2}^{P_3} \frac{dP}{\rho} + lw + w_s = 0 \quad (5.13)$$

onde lw = fator de atrito.

Considerando-se que o tubo é horizontal $g\Delta z = 0$ e que não há trabalho de eixo $w_s = 0$, então tem-se:

$$\frac{\Delta \bar{u}^2}{2} + \frac{\Delta P}{\rho} + lw = 0 \quad (5.14)$$

usando a equação da continuidade quando não há aspiração de ar:

$$\rho \bar{u}_3 A_3 = \rho \bar{u}_2 A_2 \quad (5.15)$$

isolando-se u_2 e substituindo-se A_2 e A_3 em função de D_2 e D_3 tem-se:

$$\bar{u}_2 = 16 \bar{u}_3 \quad (5.16)$$

Partindo da equação 5.14 é possível isolar P_2 em função de P_3 , ρ e $\bar{u}_3$, obtendo-se:

$$P_2 = P_3 - \rho (127,5 \bar{u}_3^{-2} - lw) \quad (5.17)$$

Observando-se a equação 5.17 é possível fazer as seguintes observações:

Se $u_b = \bar{u}_3$ (velocidade média), cresce muito e o termo $127,5 \bar{u}_3^{-2}$ cresce mais rápido que lw , fator relacionado ao atrito, e o termo $\rho (127,5 \bar{u}_3^{-2} - lw)$ aumenta mais que P_3 , logo P_2 diminui, havendo aspiração de ar.

Se u_b continua aumentando tal que lw cresce mais rapidamente que $127,5 \bar{u}_3^{-2}$ e o termo $\rho (127,5 \bar{u}_3^{-2} - lw)$ aumenta menos que P_3 , logo P_2 aumenta e pode ser que P_2 seja maior que P_a (pressão atmosférica), logo o Venturi não aspira ar.

6 CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados obtidos no trabalho experimental desta pesquisa, foi possível extrair as seguintes conclusões:

- Os experimentos realizados indicaram que o sistema de flotação é eficiente nas condições estudadas tanto em sistema descontínuo quanto em sistema contínuo.
- O aumento das vazões de reciclo de água residuária (Q_L), para mesmo tempo de reciclo de água residuária, forneceu maior queda de pressão no Venturi, aumentando a quantidade de ar aspirado até um certo limite, diferente para cada Venturi estudado, a partir do qual a quantidade de ar aspirado começava a diminuir.
- De maneira geral, para mesmo tempo de reciclo, o aumento de Q_L forneceu maiores eficiências de separação de sólidos pelo fato de formarem maior número de bolhas de ar.
- Para mesma Q_L o flotador é mais eficiente para maiores tempos de reciclo de água residuária pelo fato de promoverem maior possibilidade de colisão entre bolhas e flocos, devido ao maior tempo de residência no tanque de flotação.
- O Venturi 3 apresentou as melhores eficiências de separação de sólidos nos experimentos em sistema contínuo. Sendo que a melhor condição estudada foi vazão de reciclo de água residuária (Q_L) de 800 L.h^{-1} , correspondente a Q_{ar} de 240 L.h^{-1} , que forneceu eficiências de separação de sólidos de 87% e 100%, para tempos de reciclo de 15 e 60 min, respectivamente.

- Considerando-se os experimentos conduzidos de modo descontínuo e comparando-se os mesmos valores de Q_L estudados, o Venturi 4 apresentou os menores valores de eficiência de separação de sólidos, provavelmente devido a formação de bolhas grandes de ar ocasionada pela ausência da pedra porosa na garganta do Venturi. Para Q_L de 300 $L.h^{-1}$ foram encontrados os seguintes valores, 49% para $t = 15$ min e 75% para $t = 60$ min. Já para Q_L de 1000 $L.h^{-1}$ as eficiências obtidas foram de 60% para $t = 15$ min e 92% para $t = 60$ min.
- A aspiração de ar pelo Venturi, independente da configuração estudada, passa por uma faixa de máximo em relação ao aumento da vazão de reciclo de água residuária, cujos valores de Q_{ar} vão depender do tubo Venturi analisado.
- Para o equipamento operando em sistema descontínuo as melhores condições para obtenção de maior eficiência de separação de sólidos foram obtidos com o Venturi 3: Q_L de 800 e 900 $L.h^{-1}$, correspondente a Q_{ar} de 240 $L.h^{-1}$, maiores tempos de reciclo forneceram melhores resultados.
- Para o equipamento operando em sistema contínuo as melhores condições para obtenção de maior eficiência de separação de sólidos foram Q_{al} de 200 $L.h^{-1}$, correspondente a tempo de detenção de 30 min, Q_L de 800 $L.h^{-1}$, correspondente a Q_{ar} de 400 $L.h^{-1}$.
- Os experimentos conduzidos em sistema contínuo apresentaram valores mais baixos de eficiência de separação de sólidos tanto para o Venturi 3 quanto para o Venturi 4.

- Aparentemente, o flotador com o Venturi 4 forneceu melhores eficiências de separação de sólidos em relação ao Venturi 3 nos experimentos conduzidos de modo contínuo para t_h de 15 e 30 min.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Determinar as propriedades da água residuária estudada (diâmetro de partícula, distribuição de tamanho de partícula, hidrofobicidade) e relacionar com eficiência de separação de sólidos.

Caracterizar as bolhas de ar produzidas pelo Venturi (diâmetro de bolha, distribuição de tamanho de bolha, quantidade de bolhas) e avaliar o desempenho do flotador frente a estas propriedades.

Testar o flotador para remoção de matéria suspensa em água residuária real.

Testar o equipamento para águas residuárias com concentrações maiores de leite e em outras águas residuárias distintas.

Testar o flotador para remoção de óleo em águas residuárias.

Testar outros tubos Venturi com diferentes relações entre diâmetro da garganta e da tubulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-SHAMRANI, A. A.; JAMES, A.; XIAO H. Destabilisation of oil-water emulsions an separation by dissolved air flotation. *Water Research*, Great Britain: Elsevier Science, v. 36, n. 6, p. 1503-1512, 2002.

APHA; AWWA & WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20. ed. Washington D. C./USA: American Public Health Association, 1998.

ASLAN, M. M.; CROFCHECK, C.; TAO, D.; MENGÜÇ, M. P. Evaluation of micro-buble size and gas hold-up in two-phase gas-liquid columns via scattered light measurements. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, Elsevier, v. 101, p. 527-539, 2006.

AVELINO, S. *Recuperação de proteínas por precipitação e flotação: polieletrólitos e éteres de celulose como precipitantes*. 1997. 150 p. Tese (Doutorado)– Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 1997.

BLÖCHER, C.; DORDA, J.; MAVROV, V.; CHMIEL, H.; LAZARIDIS, N. K.; MATIS, K. A. Hybrid flotation – membrane filtration process for the removal of heavy metal ions from wastewater. *Water Research*, Great Britain: Elsevier Science, v. 37, n. 16, p. 4018-4026, 2003.

BRASIL. Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.

BRASIL. Lei Federal nº 9.443, de 08 de janeiro de 1997. Política e Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

CHUNG, Y.; CHOI, Y. C.; CHOI, Y. H.; KANG, S. A demonstration scaling-up of the dissolved air flotation. *Water Research*, Great Britain: Elsevier Science, v. 34, n. 3, p. 817-824, 2000.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Publicada no DOU nº 53, de 18 de março de 2005, Seção 1, páginas 58-63. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>. Acesso em: 14/03/2008.

COSSICH, E. S. Tratamento de efluentes: Parte II. (Apostila). 2006.

COUTO, H. J. B.; MELO, M. V.; MASSARANI, G. Tratamento de efluentes da indústria Láctea através da flotação por ar dissolvido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 30., 2002, São Carlos. *CD ROM...* São Carlos, 2002. 9 p.

COUTO, H. J. B.; MELO, M. V.; MASSARANI, G. Treatment of milk industry effluent by dissolved air flotation. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 21, No. 01, pp. 83 - 91, January - March 2004.

DE JULIO, M.; NEVES, E. F, A.; TROFINO, J. C.; DI BERNARDO, L. Emprego do reagente de fenton como agente coagulante na remoção de substâncias húmicas de água por meio da flotação por ar dissolvido e filtração. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, 2006.

EDZWALD, J. K. Algae, bubbles, coagulants and dissolved air flotation. *Water Science and Technology*, Great Britain: IWA Publishing, v. 27, n. 10, p. 67-81, 1993.

FÉRIS, L. A.; RUBIO, J. Dissolved air flotation (DAF) performance at low saturation pressures. *Filtration & Separation*, November 1999.

FLINT, L. R.; HOWARTH, W. J. The collision efficiency of small particles with spherical air bubbles. *Chemical Engineering Science*, Oxford: Pergamon Press, v. 26, n. 8, p. 1155-1168, 1971.

FRANÇA, S. C. A. Utilização do processo de flotação por ar dissolvido no tratamento de efluentes da indústria minero-metalúrgica. Relatório Técnico, CETEM/MCT, 2003. 23p.

FREUND, J.; DOBIÁŠ, B. The role of surface tension. In: MATIS, K. A. (editor). *Flotation Science and Engineering*. New York: Marcel Dekker, Inc, p. 45-61, 1995.

GALAMBOS, I.; MOLINA, J. M.; JÁRAY, Peter; VATAI, Gyula; BEKÁSSYMOLNÁR, E. High organic content industrial wastewater by membrane filtration. *Desalination*. V. 162, p. 117 - 120, 2004.

GALLEGOS-ACEVEDO, P. M.; PÉREZ-GARIBAY, R.; URIBE-SALAS, A. Maximum bubble loads: Experimental measurement vs. analytical estimation. *Minerals Engineering*. Elsevier, v. 19. p. 12-18, 2006.

GIORDANO, G. Tratamento e controle de efluentes industriais. 2005, 81p. Disponível em:
http://www.ufmt.br/esa/Modulo_II_Efluentes_Industriais/Apost_EI_2004_1ABES_Mato_Grosso_UFMT2.pdf. Acesso em: 22/07/2008.

GIRGIN, E. H.; DO, S.; GOMES, C.O.; FINCH, J. A. Bubble size as a function of impeller speed in a self-aeration laboratory flotation cell. *Minerals Engineering*. Elsevier, v. 19, p. 201-203, 2006.

GONÇALVES, D. *Física: do científico e do vestibular*. Rio de Janeiro: Ao livro técnico S. A., v. 2, 1968. 509p.

JOKELA, P.; IHALAINEN, E.; HEINANEN, J.; VIITASAARI, M. Dissolved air flotation of concentrated fish farming wastewaters. *Water Science and Technology*, IWA Publishing, v. 43, n. 8, p. 1115-121, 2001.

LOVETT D. A.; TRAVERS, S. M. Dissolved air flotation for abattoir wastewater. *Water Research*, Great Britain: Pergamon Press Ltd, v. 20, n. 4, p. 421-426, 1986.

MANJUNATH, N.T.; MEHROTRA, I.; MATHUR, R. P. Treatment of wastewater from slaughterhouse by DAF-UASB system. *Water Research*, Great Britain: Elsevier Science, v. 34, n. 6, p. 1930-1936, 2000.

MATHEWS, A.; BISHNOI, P. R.; SVRCEK, W. Y. Treatment of oil contaminated waste waters by foam fractionation. *Water Research*, Great Britain: Pergamon Press Ltd, v. 13, n. 4, p. 385-391, 1979.

MAVROV, V.; BÉLIÈRES, E. Reduction of water consumption and wastewater quantities in the food industry by water recycling using membrane process. *Desalination*. v. 131, p. 75 – 86, 2000.

MEDEIROS, P. C. A face oculta da privatização e os desafios da gestão social das águas no estado do Paraná. RAEGA, Curitiba, Ed. UFPR, nº. 10, pág. 117-130, 2005.

METCALF & EDDY, Inc. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 1334p.

MINHALMA, M.; PINHO, M. N. Flocculation/ Flotation/ Ultrafiltration Integrated Process for the Treatment of Cork Processing Wastewaters. *Environmental Science & Technology*, v. 35, n. 24, p. 4916-4921, 2001.

MOUDGIL, B. M.; BEHL, S. Flocculation in solid-liquid separation processes. In: MATIS, K. A. (editor). *Flotation Science and Engineering*. New York: Marcel Dekker, Inc., p. 415-439, 1995.

NGUYEN, A. V.; GEORGE, P.; JAMESON, G. J. Demonstration of a minimum in the recovery of nanoparticles by flotation: Theory and experiment. *Chemical Engineering Science*. Elsevier, v. 61, p. 2494-2509, 2006.

_____; PHAN, Chi M.; EVANS, Geoffrey M. Effect of the bubble size on the dynamic adsorption of frothers and collectors in flotation. *International Journal of Mineral Processing*. Elsevier, v. 79, p. 18-26, 2006.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. *Perry's chemical engineers' handbook*. 6 ed. New York: McGraw-Hill, 1984.

RAMALHO, R. S. *Introduction to Wastewater Treatment Processes*. 2. ed. New York: Academic Press, 1983. 580p.

RAMJEAON, T. Cleaner production in Mauritian cane-sugar factories. *Journal of Cleaner Production*, V.8, p. 503-510. 2000.

REAY, D.; RATCLIFF. G. A. Removal of fine particles from water by dispersed-air flotation: effects of bubble size and particle size on collection efficiency. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. v. 51, n. 2, p. 178-185, 1973.

REINDERS, E. H. ; LUCASSEN, J. Thin films, contact angles, wetting. In: *The Scientific Basis of flotation*. Series E: Applied Sciences. Edited by: Kenneth J. Ives. Cambridge (England): NATO Advanced science institutes series, n. 75, p. 79-109, 1984.

RICHTER, C.A.; AZEVEDO NETTO, J. *Tratamento de água: Tecnologia atualizada*. São Paulo: EDGARD BLÜCHER, 1991. 332p.

RIJK, S. E.; GRAAF, J. H. J. M. A.; BLANKEN, J. G. D. Bubble size in flotation thickening. *Water Research*, Great Britain: Pergamon Press Ltd, v. 28, n. 2, p. 465-473, 1994.

RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J. DAF-dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry. *International Journal of Mineral Processing*, Elsevier, v. 82, p. 1-13, 2007.

RUBINSTEIN, Julius B. *Column Flotação: Process, Design and Practices*. v. 2. Amsterdam: OPA (Overseas Publishers Association), 1995.

RUBIO, J.; SOUZA, M. L.; SMITH, R. W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. *Minerals Engineering*, Elsevier Science, v. 15, n. 3, p. 139-155, 2002.

SANTOS, J. F., ALEGRE, R. M. Avaliação de um flotador alternativo no tratamento de água residuária sintética In: V Workshop Internacional Brasil - Japão, 2007, Campinas, Brasil. **CD - ROM....** , 2007.

SANTOS, J. F., ANDRADE, V. T., ALEGRE, R. M. Behavior of a alternative flotation system for milk processing wastewater treatment In: XII Congreso Interamericano de Ingeniería Química/ V Congreso Argentino de Ingeniería Química, 2006, Buenos Aires, Argentina. **CD - ROM....** , 2006.

SCHNEIDER, I. A. H.; NETO, Manera V.; SOARES, A.; RECH, L.; RUBIO, J. Primary Treatment of a soybean protein bearing effluent by dissolved air flotation and by sedimentation. *Water Research*, Great Britain: Elsevier Science, v. 29, n. 1, p. 69-75, 1994.

SCHOENHALS, M. Avaliação da eficiência do processo de flotação aplicado ao tratamento primário de efluentes de abatedouro avícola. 2006. 87p. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2006.

SECRETARIA de estado do meio ambiente (São Paulo). Flotação: Nova vida para o Rio Pinheiros. Disponível em: <http://homologa.ambiente.sp.gov.br/destaque/pomar.pdf>. Acesso em 03/03/2008.

SILVA, L. F. L. R.; LAGE, P. L. C. Retenção gasosa e tamanho de bolhas em colunas de borbulhamento não isotérmicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS (ENEMP), 28., 2000, Teresópolis. *Anais...* Teresópolis, Rio de Janeiro, p. 207-211, 2000.

SOARES, H. M. Geração e caracterização de águas residuárias. In: *Tratamento biológico de águas residuárias*. Editado por: SCHIMIDELL, W. et al. Florianópolis: Gráfica PaperPrint, 2007. p. 25-47.

SVAROVSKY, L. *Monographs in chemistry and chemical engineering: Solid-liquid separation*. 2. ed. Butterworths, 1981. 333p.

TESSELE, F.; ROSA, J.J.; RUBIO, J. Os avanços da flotação no tratamento de águas, esgotos e efluentes. *Saneamento Ambiental*, n. 102, p. 30-42, 2004.

VALSARAJ, K. T. Removal of organics from water by nonfoaming flotation. In: MATIS, K. A. (editor). *Flotation Science and Engineering*. New York: Marcel Dekker, Inc., p. 365-384, 1995.

von Sperling, E. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Vol. 1, 2ª ed. Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 243p.

ZLOKARNIK, M. Separation of activated sludge from purified wastewater by induced air flotation (IAF). *Water Research*, Great Britain: Elsevier Science, v. 32, n. 4, p. 1095-1102, 1998.

ZOUBOULIS, A. I.; MATIS, K. A.; STALIDIS, G. A. Flotation techniques in waste water treatment. *Inovation in flotation technology*, p. 475 -497, 1992.

ZOUBOULIS, A. I.; AVRANAS, A. Treatment of oil-in-water by coagulation and dissolved-air flotation. *Colloids and surfaces – A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Elsevier Science, v. 172, n. 1-3, p.153-161, 2000.

APÊNDICE A

Tabela A1 – Dados da curva padrão de concentração de leite em pó.

Conc(g/L)	Abs
1,000	1,067
0,200	0,258
0,100	0,129
0,040	0,052
0,020	0,026
0,010	0,014
0,004	0,004

Tabela A2 – Vazões de ar (Q_{ar}) em função da vazão de reciclo de água residuária (Q_L) para cada Venturi estudado.

Com Barreira – V1		Sem Barreira – V2		Sem Degrau – V3		Sem Pedra – V4	
$Q_{ar}(L/h)$	$Q_L(L/h)$	$Q_{ar} L/h)$	$Q_L (L/h)$	$Q_{ar}(L/h)$	$Q_L(L/h)$	$Q_{ar}(L/h)$	$Q_L(L/h)$
72	1000	240	1000	110	1500	342	2000
99	900	234	900	210	1400	360	1900
96	800	249	800	192	1300	400	1800
90	700	186	700	222	1200	400	1700
126	600	120	600	240	1100	444	1600
102	500	96	500	240	1000	458	1500
54	400	30	400	240	900	422	1400
18	300	12	300	240	800	531	1300
				234	700	531	1200
				186	600	509	1100
				114	500	487	1000
				60	400	458	900
				12	300	300	800
						300	700
						252	600
						180	500
						120	400
						36	300

APÊNDICE B

-Experimentos utilizando o Venturi 1-

Tabela B1 – Eficiência de separação de sólidos (%) do flotador com o Venturi 1.

	t (min)	15	30	45	60
QL=1000L/h	Ensaio 1	68,17124	86,66892	91,65706	94,56681
	Ensaio 2	68,10092	91,16298	94,01182	96,31803
	Ensaio 3	69,03283	91,43287	94,28378	95,70924
QL=900L/h	Ensaio 4	81,78551	89,53694	94,4409	96,49741
	Ensaio 5	83,65878	93,1439	96,17914	98,45557
	Ensaio 7	84,53666	89,41377	92,93613	95,23921
QL=800L/h	Ensaio 8	82,66227	90,78515	94,01041	95,80222
	Ensaio 9	84,91443	92,06512	94,61894	96,78968
	Ensaio 10	83,82343	91,72911	94,28683	96,14699
QL=700L/h	Ensaio 11	71,93824	78,89264	85,61904	89,60928
	Ensaio 12	65,98178	90,35342	93,44446	95,58441
	Ensaio 13	70,40348	79,93729	85,43756	89,59332
QL=600L/h	Ensaio 14	64,28352	87,10473	90,607	93,31843
	Ensaio 15	53,03155	60,50736	84,02502	88,30804
	Ensaio 16	77,68853	92,51371	95,27188	96,88081
QL=500L/h	Ensaio 18	82,59742	91,05712	94,90244	96,90201
	Ensaio 19	78,74114	89,57708	92,32218	94,63385
	Ensaio 20	66,98696	80,06063	86,16167	90,02151
QL=400L/h	Ensaio 21	73,86473	83,91033	87,92857	91,11953
	Ensaio 22	80,40977	88,38841	92,5024	94,3724
	Ensaio 23	76,45024	87,91168	91,08186	93,76433
QL=300L/h	Ensaio 24	47,48092	56,15532	62,66112	67,91142
	Ensaio 25	69,96467	77,05568	81,66484	85,32853
	Ensaio 26	63,88788	75,09372	79,7507	84,69873

Tabela B2 – Valores médios de eficiência de separação de sólidos (%) do flotador usando o Venturi 1 calculados pelo Statistica 5.0.

t (min)	15		30		45		60	
QL (L/h)	Means	Std.Dev.	Means	Std.Dev.	Means	Std.Dev.	Means	Std.Dev.
1000	68,435	0,518936	89,75492	2,675961	93,31755	1,444446	95,53136	0,889059
900	83,32698	1,405266	90,6982	2,118931	94,51872	1,622904	96,73073	1,620822
800	83,80004	1,126264	91,52646	0,663613	94,30539	0,304688	96,2463	0,501164
700	69,44117	3,092635	83,06112	6,336884	88,16702	4,571299	91,59567	3,454361
600	65,0012	12,34415	80,04193	17,13225	89,96797	5,650596	92,83576	4,306722
500	76,10851	8,131401	86,89828	5,967639	91,12877	4,49093	93,85246	3,506169
400	76,90824	3,296471	86,73681	2,459379	90,50428	2,340978	93,08542	1,729443
300	60,44449	11,63067	69,43491	11,54222	74,69222	10,4631	79,31289	9,878989
All Grps	72,9332	9,924439	84,76908	9,701484	89,57524	7,368366	92,39882	6,420704

APÊNDICE C

-Experimentos utilizando o Venturi 2-

Tabela C1 – Eficiência de separação de sólidos (%) do flotador com o Venturi 2.

	t (min)	15	30	45	60
QL=1000L/h	Ensaio 28	83,84085	92,88146	96,43312	98,58565
	Ensaio 29	84,67756	94,99085	97,05351	98,79049
	Ensaio 30	85,1643	94,82986	97,08515	99,23306
QL=900L/h	Ensaio 31	81,23132	93,76896	96,719	98,29937
	Ensaio 32	79,23527	90,84641	94,50177	97,18953
	Ensaio 33	74,22192	87,38666	92,2667	96,12533
QL=800L/h	Ensaio 34	72,6294	88,66447	92,43742	95,97457
	Ensaio 35	82,65768	94,25876	96,81375	98,12578
	Ensaio 36	80,63569	94,77011	97,66651	98,82507
QL=700L/h	Ensaio 37	75,60447	92,52677	95,43814	97,16676
	Ensaio 38	80,88428	94,32942	96,57028	98,38431
	Ensaio 40	84,30889	93,57099	96,53961	97,01459
QL=600L/h	Ensaio 41	83,29944	92,83299	95,09721	96,88475
	Ensaio 42	78,74699	89,87016	93,40935	95,43175
	Ensaio 43	78,24611	91,36694	94,52743	96,44288
QL=500L/h	Ensaio 44	72,14687	84,40007	89,39938	92,43817
	Ensaio 45	77,28872	89,42012	93,33347	95,68148
	Ensaio 47	68,65418	85,50669	89,69154	91,95362
QL=400L/h	Ensaio 48	62,53376	74,66366	79,96313	83,96718
	Ensaio 50	69,11084	81,05279	86,00743	88,54827
	Ensaio 51	64,36628	80,12945	84,65407	87,57317
QL=300L/h	Ensaio 52	49,05237	52,93903	56,82569	59,37213
	Ensaio 53	39,03261	55,9016	59,59554	62,18129
	Ensaio 54	56,11014	58,86063	59,54826	61,61113

Tabela C2 – Valores médios de eficiência de separação de sólidos (%) do flotador usando o Venturi 2 calculados pelo Statistica 5.0.

t (min)	15		30		45		60	
QL (L/h)	Means	Std.Dev.	Means	Std.Dev.	Means	Std.Dev.	Means	Std.Dev.
1000	84,5609	0,669392	94,23405	1,174148	96,85726	0,367657	98,86973	0,330899
900	78,2295	3,611315	90,66734	3,194917	94,49582	2,226157	97,20474	1,087103
800	78,64092	5,303385	92,56444	3,387143	95,63923	2,805435	97,64181	1,4856
700	80,26588	4,385035	93,47573	0,905092	96,18268	0,644973	97,52189	0,750743
600	80,09751	2,784233	91,3567	1,481441	94,34466	0,858644	96,25313	0,744856
500	72,69659	4,343441	86,44229	2,637563	90,80813	2,191883	93,35776	2,026935
400	65,33696	3,394284	78,6153	3,453221	83,54154	3,172012	86,6962	2,413172
300	48,06504	8,581466	55,90042	2,960801	58,6565	1,585697	61,05485	1,484903
All Grps	73,48666	11,92227	85,40704	12,56793	88,81573	12,46226	91,07501	12,22929

APÊNDICE D

-Experimentos utilizando o Venturi 3-

Tabela D1 – Eficiência de separação de sólidos (%) do flotor com o Venturi 3.

	t (min)	15	30	45	60
QL=1500L/h	Ensaio 91	89,07852	97,07787	98,39205	99,19199
	Ensaio 92	87,26642	93,49973	96,11772	97,48905
	Ensaio 93	81,74443	89,76366	91,31577	93,25591
QL=1400L/h	Ensaio 88	82,52544	93,75671	96,93077	98,76195
	Ensaio 89	85,752	93,97143	97,28374	99,00124
	Ensaio 90	78,16147	94,06499	96,77722	98,50318
QL=1300L/h	Ensaio 85	85,66132	93,86293	96,98736	98,80994
	Ensaio 86	84,43258	92,76326	97,49149	99,74302
	Ensaio 87	84,43258	92,76326	97,49149	99,74302
QL=1200L/h	Ensaio 82	87,34397	94,42591	97,75859	99,56379
	Ensaio 83	80,75916	88,35079	91,88482	93,97906
	Ensaio 84	85,96745	93,64793	97,15131	98,76825
QL=1100L/h	Ensaio 79	88,48683	96,79546	98,87261	100,0000
	Ensaio 80	88,1415	96,29788	98,66586	99,98141
	Ensaio 81	88,15879	95,22692	97,02608	98,05417
QL=1000L/h	Ensaio 553	87,0138	94,08809	97,86105	99,158
	Ensaio 56	84,66363	93,87872	96,98882	98,94702
	Ensaio 573	85,80199	93,30967	96,88475	98,43395
QL=900L/h	Ensaio 58	85,71691	94,54249	97,44405	98,89483
	Ensaio 59	88,03361	95,71521	97,78802	99,00732
	Ensaio 60	86,69285	95,51118	97,49841	99,48564
QL=800L/h	Ensaio 61	84,99259	96,07859	98,82369	99,77392
	Ensaio 62	87,54727	96,8421	99,10301	100
	Ensaio 63	89,21585	97,61681	99,62831	100
QL=700L/h	Ensaio 64	86,34008	94,77722	97,44898	99,27703
	Ensaio 65	86,73058	95,29656	98,24112	99,84724
	Ensaio 66	84,18812	94,76058	97,50159	98,67631
QL=600L/h	Ensaio 67	71,3377	94,29952	97,08615	98,42373
	Ensaio 68	81,38977	94,0723	96,90431	98,38189
	Ensaio 69	82,33868	92,50849	95,2041	96,91949
QL=500L/h	Ensaio 70	81,6668	89,84439	93,11542	95,29611
	Ensaio 71	79,69654	89,71898	92,9793	94,79058
	Ensaio 72	78,96622	91,5262	94,01332	95,5056
QL=400L/h	Ensaio 73	77,28284	82,29578	86,19473	88,56195
	Ensaio 74	61,14841	78,53132	84,20234	86,79129
	Ensaio 75	70,44674	82,42472	87,29712	90,54538
QL=300L/h	Ensaio 76	71,3976	76,98744	79,90941	82,06912
	Ensaio 77	55,83069	60,8362	68,15195	72,51573
	Ensaio 78	63,61414	68,91182	74,03068	77,29242

Tabela D2 – Valores médios de eficiência de separação de sólidos (%) do flotador usando o Venturi 3 calculados pelo Statistica 5.0.

t (min)	15		30		45		60	
QL (L/h)	Means	Std.Dev.	Means	Std.Dev.	Means	Std.Dev.	Means	Std.Dev.
1500	86,02979	3,820228	93,44709	3,657389	95,27518	3,612594	96,64565	3,056591
1400	82,1463	3,809441	93,93104	0,158056	96,99724	0,259724	98,75546	0,249092
1300	84,84216	0,709411	93,12982	0,634895	97,32345	0,291059	99,432	0,538716
1200	84,69019	3,473248	67,8874	40,81801	95,59824	3,230219	97,43703	3,020995
1100	88,26238	0,194578	96,10675	0,801547	98,18818	1,01171	99,34519	1,118099
1000	85,82648	1,175274	93,75883	0,402824	97,24487	0,536155	98,84633	0,372379
900	86,81446	1,163126	74,21998	37,05427	97,57683	0,18491	99,12926	0,313713
800	87,2519	2,127062	96,84583	0,769118	99,185	0,408528	100,0025	0,229781
700	85,75293	1,369154	94,94479	0,304757	97,73056	0,442934	99,26686	0,585531
600	78,35538	6,095984	93,62677	0,975102	96,39819	1,038101	97,90837	0,856653
500	80,10985	1,396929	90,36319	1,009145	93,36935	0,561838	95,19743	0,36758
400	69,626	8,098468	81,08394	2,211573	85,89806	1,568573	88,63287	1,878053
300	63,61414	7,783453	68,91182	8,075621	74,03068	5,878731	77,29242	4,776699
All Grps	81,794	7,956244	87,55825	16,48483	94,2166	6,986836	95,99164	6,39556

APÊNDICE E

-Experimentos utilizando o Venturi 4-

Tabela E1 – Eficiência de separação de sólidos (%) do flotador com o Venturi 4.

	t (min)	15	30	45	60
QL=2000L/h	Ensaio 144	93,95813	98,77649	100	100
	Ensaio 145	93,80362	98,53727	100	100
	Ensaio 146	89,01314	95,69543	98,72137	99,8561
QL=1900L/h	Ensaio 142	95,42674	98,62815	100	100
	Ensaio 143	94,42208	99,39166	100	100
	Ensaio 144	94,06711	99,15501	100	100
QL=1800L/h	Ensaio 139	89,6268	97,27035	98,99631	99,61273
	Ensaio 140	91,11654	96,76976	98,87586	99,09755
	Ensaio 141	90,50774	98,73572	100	100
QL=1700L/h	Ensaio 136	75,30405	87,07474	91,75465	94,16552
	Ensaio 137	85,85857	94,90793	97,99796	99,32225
	Ensaio 138	79,11895	92,82694	97,29694	99,38294
QL=1600L/h	Ensaio 133	79,67746	89,14107	93,41496	95,70454
	Ensaio 134	76,0471	85,96013	92,33279	94,59863
	Ensaio 135	79,13059	88,3258	88,84384	95,31934
QL=1500L/h	Ensaio 130	73,64409	86,50501	91,86373	95,23207
	Ensaio 131	73,47227	85,40764	92,07285	94,39792
	Ensaio 132	79,66435	93,30452	97,51265	99,25395
QL=1400L/h	Ensaio 127	70,29861	85,38629	90,69184	93,34462
	Ensaio 128	65,84397	77,87526	87,50029	91,4378
	Ensaio 129	78,25723	92,58384	97,97558	99,36203
QL=1300L/h	Ensaio 124	74,50292	93,61003	97,75731	98,94225
	Ensaio 125	76,2027	91,85675	96,28714	97,76393
	Ensaio 126	79,92856	90,09369	93,85339	95,38512
QL=1200L/h	Ensaio 121	77,47728	91,71943	96,27691	98,27081
	Ensaio 122	62,11935	85,14369	93,95166	98,58743
	Ensaio 123	76,61019	91,53935	96,74492	98,90572
QL=1100L/h	Ensaio 118	67,9721	85,08395	93,79832	97,2841
	Ensaio 119	76,0591	89,66666	96,25558	98,97709
	Ensaio 120	58,2454	70,52844	83,33979	92,71717
QL=1000L/h	Ensaio 115	51,52664	78,59594	87,85649	92,60549
	Ensaio 116	57,86791	72,03557	82,81097	87,20095
	Ensaio 117	72,0951	86,25406	94,34489	97,66791
QL=900L/h	Ensaio 112	35,05666	71,47036	82,55279	88,8856
	Ensaio 113	51,86667	74,23665	83,54098	89,08398
	Ensaio 114	28,62463	56,38185	70,69416	83,70536
QL=800L/h	Ensaio 109	43,92596	60,58753	73,78695	83,74062
	Ensaio 110	51,60632	77,65214	82,5054	89,78529
	Ensaio 111	39,00305	58,2993	74,31108	83,54865
QL=700L/h	Ensaio 106	77,73159	88,4388	92,7495	96,22587
	Ensaio 107	74,63913	86,13272	91,1179	95,82612
	Ensaio 108	50,90923	67,69452	75,81049	82,08192
QL=600L/h	Ensaio 103	71,83247	82,85297	88,29684	92,14738

QL=500L/h	Ensaio 104	65,75934	78,24019	85,62134	92,06307
	Ensaio 105	67,56549	80,09896	86,29366	90,32743
	Ensaio 100	63,71407	74,94937	80,92256	83,90916
	Ensaio 101	53,79211	67,87381	75,75957	82,80042
QL=400L/h	Ensaio 102	74,34139	83,90117	87,50015	91,09913
	Ensaio 97	68,91313	73,76616	78,23096	82,30751
	Ensaio 98	60,41937	72,79095	77,68204	81,71
	Ensaio 99	54,91994	64,62954	71,60831	76,91825
QL=300L/h	Ensaio 94	50,53377	63,03137	70,36692	76,61572
	Ensaio 95	42,47029	65,85423	75,587	80,13739
	Ensaio 96	53,24951	57,12862	61,88933	70,00019

Tabela E2 – Valores médios de eficiência de separação de sólidos (%) do flotor usando o Venturi 4 calculados pelo Statistica 5.0.

t (min)	15		30		45		60	
QL (L/h)	Means	Std.Dev.	Means	Std.Dev.	Means	Std.Dev.	Means	Std.Dev.
2000	92,25829	2,811448	97,66973	1,713974	99,57379	0,738217	99,95203	0,083081
1900	94,63864	0,705213	99,05827	0,390838	100	0	100	0
1800	90,41703	0,749004	97,59194	1,021672	99,29072	0,617197	99,57009	0,452731
1700	80,09386	5,34437	91,60321	4,057446	95,68318	3,420214	97,62357	2,994915
1600	78,28505	1,957317	87,809	1,652244	91,53053	2,388828	95,2075	0,561375
1500	75,59357	3,526447	88,40572	4,277814	93,81641	3,202747	96,29465	2,596548
1400	71,4666	6,288512	85,2818	7,354849	92,05591	5,369211	94,71482	4,13599
1300	76,87806	2,775151	91,85349	1,758174	95,96595	1,971678	97,36377	1,81201
1200	72,06894	8,627496	89,46749	3,745604	95,65783	1,496004	98,58799	0,317453
1100	67,42553	8,919417	81,75968	9,992791	91,13123	6,858531	96,32611	3,238045
1000	60,49655	10,53317	78,96186	7,116306	88,33745	5,781984	92,49145	5,234414
900	38,51599	12,00097	67,36295	9,609973	78,92931	7,148941	87,22498	3,049697
800	44,84511	6,35171	65,51299	10,57489	76,86781	4,889325	85,69152	3,546611
700	67,75998	14,67487	80,75535	11,36963	86,5593	9,344419	91,37797	8,053097
600	68,38576	3,118552	80,39738	2,320826	86,73728	1,391823	91,51262	1,027278
500	63,94919	10,27666	75,57478	8,031962	81,39409	5,884478	85,93624	4,505432
400	61,41748	7,049788	70,39555	5,017264	75,84044	3,675389	80,31192	2,954148
300	48,75119	5,606347	62,00474	4,452477	69,28109	6,913088	75,58443	5,146686
All Grps	69,62482	16,3179	82,85922	12,23971	88,81402	9,718302	92,54287	7,483723

APÊNDICE F

-Experimentos conduzidos em sistema contínuo-

Tabela F1 – Dados utilizados para elaboração dos gráficos de Distribuição de tempo de residência (DTR).

t (min)	t = 15min ($Q_{al} = 400L/h$)		t = 60min ($Q_{al} = 100L/h$)	
	$Q_L = 700L/h$	$Q_L = 1000L/h$	$Q_L = 700L/h$	$Q_L = 1000L/h$
	Conc (%v/v)	Conc (%v/v)	Conc (%v/v)	Conc (%v/v)
0	0,000185	0,000173	0,000001	0,0000225
5	0,000423	0,000498	0,0004975	0,0005475
10	0,000323	0,000385	0,00046	0,0004725
15	0,000248	0,000273	0,00041	0,0004225
20	0,000198	0,000198	0,00036	0,000385
25	0,000135	0,000148	0,0003475	0,00036
30	0,00011	9,75E-05	0,00031	0,0003225
35	7,25E-05	7,25E-05	0,0002725	0,000285
40	0,00006	7,25E-05	0,0002475	0,00026
45	0,00006	4,75E-05	0,0002225	0,0002475
50	4,75E-05	0,000035	0,0001975	0,000235
55	0,000035	0,000035	0,000185	0,00021
60	0,000035	0,000035	0,0001725	0,0001975

Tabela F2 – Valores de eficiência dos experimentos conduzidos com o Venturi 3.

t(min)	t = 15min ($Q_{al} = 400L/h$)				t = 30min ($Q_{al} = 200L/h$)				t = 60min ($Q_{al} = 100L/h$)			
	$Q_L = 800L/h$		$Q_L = 1100L/h$		$Q_L = 800L/h$		$Q_L = 1100L/h$		$Q_L = 800L/h$		$Q_L = 1100L/h$	
	Conc (%v/v)	E (%)	Conc (%v/v)	E (%)	Conc (%v/v)	E (%)	Conc (%v/v)	E (%)	Conc (%v/v)	E (%)	Conc (%v/v)	E (%)
0	0,573202		0,628721		0,62778		0,662597		0,273023		0,507332	
15	0,25138	56,14461	0,423583	32,62783	0,220327	64,90379	0,299371	54,81854	0,112112	58,93679	0,169513	66,58736
30	0,258908	54,83128	0,536503	14,66756	0,240088	61,75603	0,342657	48,28576	0,111171	59,28145	0,174218	65,65996
45	0,278669	51,38381	0,531798	15,4159	0,252321	59,80742	0,444285	32,94793	0,11964	56,17952	0,16669	67,1438
60	0,274905	52,04047	0,362418	42,35631	0,26079	58,45838	0,551559	16,758	0,12905	52,73292	0,172336	66,03092
75	0,286197	50,07048	0,369005	41,30862	0,275846	56,06008	0,493217	25,56305	0,121522	55,4902	0,179864	64,54708
90	0,300312	47,608	0,3643	42,05697	0,278669	55,6104	0,267377	59,64712	0,123404	54,80088	0,174218	65,65996
105	0,262672	54,17462	0,403822	35,77087	0,272082	56,65966	0,234442	64,61771	0,129991	52,38826	0,172336	66,03092
120	0,338893	40,87721	0,454636	27,68875	0,287138	54,26137	0,225973	65,89586	0,137519	49,63098	0,168572	66,77284
135	0,330424	42,3547	0,38312	39,06359	0,228796	63,55475	0,221268	66,60595	0,145988	46,52905	0,169513	66,58736
150	0,323837	43,50386	0,386884	38,46492	0,271141	56,80955	0,222209	66,46393	0,129991	52,38826	0,16669	67,1438
165					0,269259	57,10934	0,239147	63,90762	0,161044	41,01449	0,155398	69,36956
180					0,287138	54,26137	0,237265	64,19166	0,190215	30,33005	0,14787	70,85341
195					0,266436	57,55902	0,217504	67,17401	0,195861	28,26209	0,152575	69,92601
210					0,268318	57,25923	0,146929	77,82528	0,21374	21,71356	0,167631	66,95832
225					0,254203	59,50763	0,18551	72,00259	0,224091	17,9223	0,180805	64,3616

240	0,250439	60,1072	0,202448	69,44628	0,239147	12,40775	0,180805	64,3616
255					0,247616	9,305809	0,178923	64,73256
270					0,255144	6,548533	0,1761	65,289
285					0,267377	2,067958	0,188333	62,87776
300					0,273023	0	0,206212	59,35364

Tabela F3 – Valores de eficiência dos experimentos conduzidos com o Venturi 4.

t(min)	t = 15min (Q _{al} = 400L/h)				t = 30min (Q _{al} = 200L/h)				t = 60min (Q _{al} = 100L/h)	
	Q _L = 800L/h		Q _L = 1900L/h		Q _L = 800L/h		Q _L = 1900L/h		Q _L = 800L/h	
	Conc (%v/v)	E (%)	Conc (%v/v)	E (%)	Conc (%v/v)	E (%)	Conc (%v/v)	E (%)	Conc (%v/v)	E (%)
0	0,702119		0,610842		0,5525		0,824449		0,700237	
15	0,361477	48,51628	0,231619	62,08201	0,161985	70,68145	0,242911	70,53656	0,390648	44,21203
30	0,353949	49,58846	0,239147	60,84961	0,154457	72,04398	0,219386	73,38999	0,41135	41,2556
45	0,362418	48,38225	0,257967	57,76862	0,164808	70,1705	0,203389	75,33031	0,408527	41,65875
60	0,359595	48,78432	0,265495	56,53622	0,162926	70,51113	0,190215	76,92823	0,365241	47,84037
75	0,357713	49,05237	0,267377	56,22812	0,162926	70,51113	0,19492	76,35754	0,328542	53,08131
90	0,351126	49,99053	0,264554	56,69027	0,171395	68,97828	0,193979	76,47168	0,318191	54,55953
105	0,362418	48,38225	0,25138	58,84697	0,1761	68,1267	0,218445	73,50412	0,316309	54,82829
120	0,362418	48,38225	0,243852	60,07937	0,189274	65,74226	0,261731	68,25383	0,332306	52,54378
135	0,343598	51,06271	0,242911	60,23342	0,18551	66,42353	0,316309	61,63389	0,312545	55,36583
150	0,26079	62,85672	0,193038	68,39805	0,182687	66,93448	0,360536	56,26946	0,318191	54,55953
165					0,181746	67,1048	0,394412	52,16053		
180					0,191156	65,40163	0,419819	49,07884		
195					0,177982	67,78606	0,397235	51,81812		

Tabela F4 – Valores de eficiência dos experimentos conduzidos com o Venturi 3 e insuflação de ar para tempo de detenção de 30 min.

t(min)	Q _L = 800L/h		Q _L = 1100L/h	
	Conc (%v/v)	E (%)	Conc (%v/v)	E (%)
0	0,631544		0,631544	
15	0,234442	62,87796	0,227855	63,92096
30	0,257026	59,30196	0,206212	67,34796
45	0,253262	59,89796	0,19492	69,13596
60	0,256085	59,45096	0,206212	67,34796
75	0,26079	58,70597	0,206212	67,34796
90	0,262672	58,40797	0,217504	65,55996
105	0,276787	56,17297	0,218445	65,41096
120	0,250439	60,34496	0,211858	66,45396
135			0,220327	65,11296
150			0,226914	64,06996
165			0,221268	64,96396
180			0,203389	67,79496
195			0,20433	67,64596

