

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

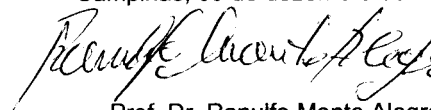
**ESTUDO DE TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO EM REATORES
TIPO *AIR-LIFT* UTILIZANDO VENTURI E PEÇAS CISALHANTES**

PARECER

Este exemplar corresponde
redação final da tese defendida
Maria Assima Bittar Gonçalves
aprovada pela Comissão Julgadora
em 09 de dezembro de 1999.

Maria Assima Bittar Gonçalves
Engenheira Química
Mestre em Engenharia de Alimentos

Campinas, 09 de dezembro de 1999



Prof. Dr. Ranulfo Monte Alegre
Presidente da Banca

Orientador – Prof. Dr. Ranulfo Monte Alegre

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de
Campinas como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia de Alimentos

Campinas, 1999
São Paulo – Brasil



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	12/1999
V	6586e
EX	
FORMA BC	39874
PREÇO	2781,00
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	11/01/00
N.º CPD	

CM-00133174-2

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA F.E.A. - UNICAMP

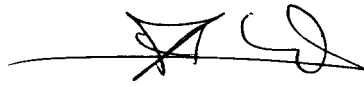
G586e
Gonçalves, Maria Assima Bittar
Estudo de Transferência de oxigênio em reatores tipo air-lift
utilizando venturi e peças cisalhantes / Maria Assima Bittar
Gonçalves. – Campinas, SP: [s.n.], 1999.

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

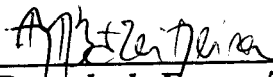
1.Tubo venturi. 2.Cisalhamento. 3.Transferência de massa.
4.Reservatórios – Aeração. I.Alegre, Ranulfo Monte.
II.Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
de Alimentos. III.Título.

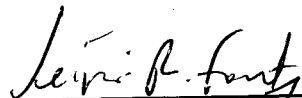
BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Ranulfo Monte Alegre
(presidente)


Prof. Dr. Fernando Antônio Cabral
(membro)


Prof. Dr. Luiz Antônio Viotto
(membro)


Dr. Maurício Broxado de França Teixeira
(membro)


Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes
(membro)

Prof. Dr. Denis Miguel Roston
(membro)

Prof. Dr. Fernanda Elizabeth Xidieh Murr
(membro)

ERRATA

Na NOMENCLATURA, página xii, a letra E indica potência (W) e na página xiv a letra grega ϵ indica potência por unidade de volume ($W\ m^{-3}$).

No APÊNDICE C, página 136, referente as figuras 4.24 a 4.26, para a vazão de ar de 383,0 ml/min o valor da razão ar/líquido (ϕ) = 0,06 deve ser substituído por $\phi = 0,0766$.

Nas figuras de 4.27 a 4.41, paginas de 61 a 68, e no APÊNDICE D, página 138, para a vazão de ar de 383,0 ml/min o valor da razão ar/líquido (ϕ) = 0,0600 deve ser substituído por $\phi = 0,0766$.

*À Deus.
Ao meu pai (em memória) e a minha mãe
que dedicaram suas vidas aos filhos.
Aos meus irmãos queridos.
A você Gustavo lindo.
E ao Reinaldo, que eu amo.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ranulfo Monte Alegre pela orientação, amizade e dedicação, especialmente na etapa de construção do equipamento do projeto de tese.

Aos colegas e amigos do laboratório de Processos Fermentativos e Tratamentos de Resíduos do DEA/FEA/UNICAMP, pelo companheirismo.

Às amigas Simone H. Flôres e Tânia Maria Alberte pela cumplicidade no trabalho e nos momentos de descontração.

Ao colega e amigo Maurício Broxado de França Teixeira.

Aos amigos Marco Antônio Guerreiro e Eliana Setsuko Kamimura, solidários desde o começo.

Aos Professores do DEA/FEA/UNICAMP, em especial ao Prof Dr. Satoshi Tobinaga.

Ao Prof. Lincoln C. Neves Filho pelo empréstimo do banho refrigerador e ao funcionário Carlos Antônio Parreira Jr. pelos reparos nele realizados para que eu pudesse utiliza-lo.

A todos os funcionários do DEA/FEA/UNICAMP, e em especial ao Sr. Aparecido José Contiero e a Sra. Maria Domingos Gonçalves.

À CAPES e à FAPESP, pela concessão da bolsa de doutorado e recursos financeiros para a montagem do equipamento.

A todos meus *amigos*.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE FIGURAS	viii
NOMENCLATURA	xii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 – Histórico	2
2.2 – Aeradores	3
2.2.1 – Tipos de aeradores	3
2.3 – Reatores acoplados com dispositivo de Aeração	7
2.4 – Reatores <i>air-lift</i>	14
2.4.1 – Reatores <i>air-lift</i> acoplados com dispositivos tipo “Bernoulli”	17
2.5 – Transferência de Massa	18
2.5.1 – Princípios de Transferência de Massa	18
2.5.2 – Transferência de Massa Gás-Líquido em Sistemas Celulares	19
CAPÍTULO 3 – MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 – Construção e Funcionamento do Equipamento e Acessórios	22
3.1.1 – Trocador de Calor	23
3.1.2 – Reator “Air-lift” e Separador de Bolhas	25
3.1.3 – Peças Cisalhantes	25
3.2 – Condições Experimentais	26
3.3 – Perda de carga	26
3.4 – Análise Dimensional	26
3.5 – Transferência de Massa	27
3.5.1- Determinação do k_{la}	27
3.6 – Eficiência de transferência da unidade de Aeração	29
3.7 – Tensão Superficial	29
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	31

4.1 – Coeficiente Volumétrico de Transferência de Massa.....	31
4.2 – Eficiência de Transferência de Oxigênio do Sistema.....	34
4.3 – Influência das Peças Cisalhantes.....	39
4.4 – Influência da Temperatura	45
4.5 – Perda de Carga	51
4.5.1 – Medidas de Pressões	51
4.6 – Comportamento dos números adimensionais.....	58
4.6.1 – Razão ar/líquido	58
4.6.1.1 – Eficiência de transferência de oxigênio em função da razão ar/líquido.....	58
4.6.1.2 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa ($k_L a$) em função da razão ar/líquido	61
4.6.2 – Vazão de Ar em Função do número Adimensional $Q_L/(L^3 k_L a)$	69
4.6.3 – Eficiência da Unidade de Aeração em Função do número adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$	74
4.6.3.1 Tensão Superficial.....	74
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	80
6 - BIBLIOGRAFIA	81
APÊNDICE A	85
APÊNDICE B	135
APÊNDICE C	137
APÊNDICE D	137
APÊNDICE E	140
APÊNDICE F.....	142
ANEXO A	144

RESUMO

A aplicação de reatores *air-lift* em tratamento de águas residuárias é muito atrativa, pois estes reatores apresentam em relação aos convencionais, altas taxas de transferência de oxigênio do ar para água, com grande possibilidade de tratar águas com altas concentrações de carga poluidora com custos moderados.

A utilização de venturis e bombas centrífugas para promover a aeração de reatores *air-lift*, como forma de evitar o uso de compressores que são máquinas caras, pode tornar o uso destes reatores mais vantajoso, já que eles são equipamentos de custo baixo em comparação aos compressores.

O objetivo deste trabalho foi estudar a utilização de venturi no tubo de alimentação de um do reator *air-lift*, como forma de promover a aeração do mesmo, bem como determinar o coeficiente e a eficiência de transferência de massa da unidade de aeração.

Com o objetivo de aumentar o coeficiente de transferência de massa, foram inseridas no tubo de alimentação do reator peças para reduzir a área de seção transversal do tubo, de forma a provocar o cisalhamento do líquido e bolhas de ar em circulação e consequentemente, aumentar a área interfacial de transferência de massa.

Os experimentos foram realizados com vazões diferentes de líquido e ar, em três temperaturas com e sem a inserção das peças para promover o cisalhamento da mistura no tubo de alimentação do reator. As medidas de concentração de oxigênio dissolvido foram realizadas através de eletrodo específico.

Em algumas condições experimentais, com o uso de peças cisalhantes no tubo de alimentação do reator, o valor do coeficiente de transferência de oxigênio dobrou e a eficiência da unidade de aeração atingiu valores ao redor de 1,5 kg O₂/kWh para água.

Embora os experimentos tenham sido direcionados para estudar a transferência de oxigênio para a água, outras aplicações como carbonatação de bebidas, sulfitação de caldo de cana, etc. podem ser implementadas por este sistema.

ABSTRACT

The application of air-lift reactors in wastewater treatment is very attractive, when compared to the conventional ones, as they show high air to water oxygen transfer rates from, with great possibility of treating wastewater with high pollutants concentration with moderate costs.

The use of venturis and centrifugal pumps as means of promoting air-lift reactors aeration, as a form of avoiding compressors use which are expensive machines, can turn the use of these reactors more advantageous, since those are equipments of low cost in comparison with the compressors.

In this sense, this work aims at studying the effect of application of a venturi in the feeding tube of the air-lift reactor, as a form of promoting its aeration, as well as to determine the mass transfer coefficient and efficiency of the aeration unit.

With the purpose of increasing the mass transfer coefficient, pieces were inserted in the reactor's feeding tube to reduce its section area and promote the liquid and air bubbles shearing and, consequently, to increase the interfacial area of mass transfer.

The experiments were accomplished with different liquid and air rates in three different temperatures, with and without shearing pieces into the feeding tube. The dissolved oxygen concentration were measured by means of a polarograph probe.

In some experimental conditions, with the use of shearing pieces in the reactor's feeding tube, the value of the oxygen transfer coefficient doubled and the aeration unit efficiency reached values up to 1,5 kg O₂/kWh for water.

Although the experiments had been made to study the air to water oxygen transfer, other applications like carbonation of beverages, cane juice sulphiting, etc can be done by this system.

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Eficiência de transferência para diferentes sistemas de aeração	6
TABELA 4.1 – Valores do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($k_{La}(h^{-1})$), sem peça cisalhante (SPC), utilizando 1 peça cisalhante (1 PC), 2 peças cisalhantes (2 PC), 3 peças cisalhantes (3 PC) e 3 peças cisalhantes menores (3 PCM) em diferentes vazões de líquido (Q_L) e de ar (Q_A) na temperatura de 20°C	32
TABELA 4.2 – Valores do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($k_{La}(h^{-1})$), sem peça cisalhante (SPC), utilizando 1 peça cisalhante (1 PC), 2 peças cisalhantes (2 PC), 3 peças cisalhantes (3 PC) e 3 peças cisalhantes menores (3 PCM) em diferentes vazões de líquido (Q_L) e de ar (Q_A) na temperatura de 30°C	33
TABELA 4.3 – Valores do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($k_{La}(h^{-1})$), sem peça cisalhante (SPC), utilizando 1 peça cisalhante (1 PC), 2 peças cisalhantes (2 PC), 3 peças cisalhantes (3 PC) e 3 peças cisalhantes menores (3 PCM) em diferentes vazões de líquido (Q_L) e de ar (Q_A) na temperatura de 35°C	34
TABELA 4.4 – Valores da eficiência de transferência da unidade de aeração ($TE(kg\ O_2/kWh)$), calculada na temperatura de 20°C, para os experimentos: sem a utilização de peças cisalhantes, utilizando 1, 2 ou 3 peças cisalhantes (PC) de mesmas dimensões e 3 peças cisalhantes menores (3 PCM)	35
TABELA 4.5 – Valores da eficiência de transferência da unidade de aeração ($TE(kg\ O_2/kWh)$), calculada na temperatura de 30°C, para os experimentos: sem a utilização de peças cisalhantes, utilizando 1, 2 ou 3 peças cisalhantes (PC) de mesmas dimensões e 3 peças cisalhantes menores (3 PCM)	36
TABELA 4.6 – Valores da eficiência de transferência da unidade de aeração ($TE(kg\ O_2/kWh)$), calculada na temperatura de 20°C, para experimentos os experimentos: sem a utilização de peças cisalhantes, utilizando 1, 2 ou 3 peças cisalhantes (PC) de mesmas dimensões e 3 peças cisalhantes menores (3 PCM)	37
TABELA 4.7 – Valores das pressões depois da bomba (PDB), e depois do venturi (PDV,) em diferentes vazões de líquido e de ar e sob a influência de peças cisalhantes nas seguintes condições: sem peça cisalhante (SPC), 1 peça cisalhante (1 PC), 2 peças cisalhantes (2 PC), 3 peças cisalhantes (3 PC), 3 peças cisalhantes menores (3 PCM).	51
TABELA 4.8 – Valores das pressões medidas na saída do venturi e a diferença de pressão entre o venturi e a pressão (DP) calculada a partir da pressão manométrica calculada na entrada do reator, (kgf/cm^2).	52
TABELA A1 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar	85
TABELA A2 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar	87
TABELA A3 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar	89

TABELA A4 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar	91
TABELA A5 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar	93
TABELA A6 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar	94
TABELA A7 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar	95
TABELA A8 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar	96
TABELA A9 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar	97
TABELA A10 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar	99
TABELA A11 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar	100
TABELA A12 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar	101
TABELA A13 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar	102
TABELA A14 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar	103
TABELA A15 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar	104
TABELA A16 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar	105
TABELA A17 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar	106
TABELA A18 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar	107

TABELA A19 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar. 108

TABELA A20 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar. 109

TABELA A21 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar. 110

TABELA A22 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar. 111

TABELA A23 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar. 112

TABELA A24 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar. 113

TABELA A25 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar. 114

TABELA A26 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar. 115

TABELA A27 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar. 116

TABELA A28 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar. 117

TABELA A29 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar. 118

TABELA A30 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar. 119

TABELA A31 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar. 120

TABELA A32 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar. 121

TABELA A33 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar. 122

TABELA A34 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.	123
TABELA A35 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.	124
TABELA A36 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.	125
TABELA A37 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.	126
TABELA A38 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.	127
TABELA A39 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.	128
TABELA A40 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.	129
TABELA A41 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.	130
TABELA A42 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.	131
TABELA A43 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.	132
TABELA A44 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.	133
TABELA A45 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.	134
TABELA B1 – Valores das concentrações de oxigênio durante os experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 200 (l/h) e vazão de ar de 1600 ml/min.	135
TABELA C1 – Valores da eficiência de transferência de massa em função da razão entre a vazão de ar e de líquido (ϕ) a 20 °C.	136
TABELA C2 – Valores da eficiência de transferência de massa em função da razão entre a vazão de ar e de líquido (ϕ) a 30 °C.	136
TABELA C3 – Valores da eficiência de transferência de massa em função da razão entre a vazão de ar e de líquido (ϕ) a 35 °C.	137

TABELA D1 - Valores do coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da razão entre a vazão de ar e de líquido (ϕ) a 20 °C..... 138

TABELA D2 - Valores do coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da razão entre a vazão de ar e de líquido (ϕ) a 30 °C..... 138

TABELA D3 - Valores do coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da razão entre a vazão de ar e de líquido (ϕ) a 35 °C..... 139

TABELA E1 – Valores da vazão de ar em função do número adimensional $(Q_L)/(L^3k_{La})$ em diferentes vazões de líquido a 20°C 140

TABELA E2 – Valores da vazão de ar em função do número adimensional $(Q_L)/(L^3k_{La})$ em diferentes vazões de líquido a 30°C 140

TABELA E3 – Valores da vazão de ar em função do número adimensional $(Q_L)/(L^3k_{La})$ em diferentes vazões de líquido a 35°C 141

TABELA F1 – Valores da eficiência de transferência de oxigênio e do adimensional em diferentes vazões de ar a 20°C..... 142

TABELA F2 – Valores da eficiência de transferência de oxigênio e do adimensional em diferentes vazões de ar a 30°C..... 142

TABELA F3 – Valores da eficiência de transferência de oxigênio e do adimensional em diferentes vazões de ar a 35°C..... 143

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Dispositivo de Aeração de ar atmosférico	3
FIGURA 2.2 – Tubos Estáticos.....	4
FIGURA 2.3 – Disco Difusor	5
FIGURA 2.4 – Dispositivo Venturi.....	5
FIGURA 2.5 – Ejetor.....	6
FIGURA 2.6 – Gradientes da concentrações próximos da interface Gás-Líquido	18
FIGURA 2.7 - Resistências de transferência de oxigênio em sistemas celulares	20
FIGURA 3.1 – Fluxograma simplificado do sistema experimental montado.....	23
FIGURA 3.2 – Trocador de calor.....	24
FIGURA 3.3 – Desenho esquemático do Venturi com suas dimensões geométricas	24
FIGURA 3.4 – Desenho mecânico das peças cisalhantes.....	25
FIGURA 4.1 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 20^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 198,0 \text{ ml/min}$) ..	40
FIGURA 4.2 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 20^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 383,0 \text{ ml/min}$) ..	41
FIGURA 4.3 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 20^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 522,0 \text{ ml/min}$) ..	41
FIGURA 4.4 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 30^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 198,0 \text{ ml/min}$) ..	42
FIGURA 4.5 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 30^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 383,0 \text{ ml/min}$) ..	42
FIGURA 4.6 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 30^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 522,0 \text{ ml/min}$) ..	43
FIGURA 4.7 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 35^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 198,0 \text{ ml/min}$) ..	43
FIGURA 4.8 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 35^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 383,0 \text{ ml/min}$) ..	44
FIGURA 4.9 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 35^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 522,0 \text{ ml/min}$) ..	44
FIGURA 4.10 – Influência da temperatura no coeficiente de transferência de massa (k_{ja}), em diferentes vazões de ar: (a) $198,0 \text{ ml/min}$, (b) $383,0 \text{ ml/min}$ e (c) $522,0 \text{ ml/min}$, sem a utilização de peças cisalhantes	46
FIGURA 4.11 – Influência da temperatura no coeficiente de transferência de massa (k_{ja}), em diferentes vazões de ar: (a) $198,0 \text{ ml/min}$, (b) $383,0 \text{ ml/min}$ e (c) $522,0 \text{ ml/min}$, utilizando 1 peça cisalhante	47
FIGURA 4.12 – Influência da temperatura no coeficiente de transferência de massa (k_{ja}), em diferentes vazões de ar: (a) $198,0 \text{ ml/min}$, (b) $383,0 \text{ ml/min}$ e (c) $522,0 \text{ ml/min}$, utilizando 2 peças cisalhantes	48
FIGURA 4.13 – Influência da temperatura no coeficiente de transferência de massa (k_{ja}), em diferentes vazões de ar: (a) $198,0 \text{ ml/min}$, (b) $383,0 \text{ ml/min}$ e (c) $522,0 \text{ ml/min}$, utilizando 3 peças cisalhantes	49

FIGURA 4.14 – Influência da temperatura no coeficiente de transferência de massa (k_{ja}), em diferentes vazões de ar: (a) 198,0 ml/min, (b) 383,0 ml/min e (c) 522,0 ml/min, utilizando 3 peças cisalhantes menores	50
FIGURA 4.15 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga a 20°C e vazão de ar de 198,0 ml/min	53
FIGURA 4.16 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga a 30°C e vazão de ar de 198,0 ml/min	53
FIGURA 4.17 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga a 35°C e vazão de ar de 198,0 ml/min	54
FIGURA 4.18 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga a 20°C e vazão de ar de 383,0 ml/min	54
FIGURA 4.19 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga a 30°C e vazão de ar de 383,0 ml/min	55
FIGURA 4.20 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga a 35°C e vazão de ar de 383,0 ml/min	55
FIGURA 4.21 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga a 20°C e vazão de ar de 522,0 ml/min	56
FIGURA 4.22 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga a 30°C e vazão de ar de 522,0 ml/min	56
FIGURA 4.23 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga a 35°C e vazão de ar de 522,0 ml/min	57
FIGURA 4.24 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função da razão volumétrica ar-líquido a 20°C, com e sem a utilização de peças cisalhantes	59
FIGURA 4.25 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função da razão volumétrica ar-líquido a 30°C, com e sem a utilização de peças cisalhantes	59
FIGURA 4.26 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função da razão volumétrica ar-líquido a 35°C, com e sem a utilização de peças cisalhantes	60
FIGURA 4.27 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{ja}) em função da razão ar-líquido (ϕ), sem a utilização de peças cisalhantes a 20°C.	61
FIGURA 4.28 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{ja}) em função da razão ar-líquido (ϕ), sem a utilização de peças cisalhantes a 30°C.	62
FIGURA 4.29 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{ja}) em função da razão ar-líquido (ϕ), sem a utilização de peças cisalhantes a 35°C.	62
FIGURA 4.30 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{ja}) em função da razão ar-líquido (ϕ), utilizando 1 peça cisalhante a 20°C.	63
FIGURA 4.31 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{ja}) em função da razão ar-líquido (ϕ), utilizando 1 peça cisalhante a 30°C.	63
FIGURA 4.32 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{ja}) em função da razão ar-líquido (ϕ), utilizando 1 peça cisalhante a 35°C.	64
FIGURA 4.33 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{ja}) em função da razão ar-líquido (ϕ), utilizando 2 peças cisalhantes a 20°C.	64
FIGURA 4.34 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{ja}) em função da razão ar-líquido (ϕ), utilizando 2 peças cisalhantes a 30°C.	65
FIGURA 4.35 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{ja}) em função da razão ar-líquido (ϕ), utilizando 2 peças cisalhantes a 35°C.	65

FIGURA 4.36 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{ia}) em função da razão AR/LÍQUIDO (ϕ), utilizando 3 peças cisalhantes a 20°C. 66

FIGURA 4.37 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{ia}) em função da razão AR/LÍQUIDO (ϕ), utilizando 3 peças cisalhantes a 30°C. 66

FIGURA 4.38 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{ia}) em função da razão AR/LÍQUIDO (ϕ), utilizando 3 peças cisalhantes a 35°C. 67

FIGURA 4.39 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{ia}) em função da razão AR/LÍQUIDO (ϕ), utilizando 3 peças cisalhantes menores a 20°C. 67

FIGURA 4.40 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{ia}) em função da razão AR/LÍQUIDO (ϕ), utilizando 3 peças cisalhantes menores a 30°C. 68

FIGURA 4.41 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{ia}) em função da razão AR/LÍQUIDO (ϕ), utilizando 3 peças cisalhantes menores a 35°C. 68

FIGURA 4.42 - Número adimensional $Q_L/(L^3 k_{ia})$ em função da vazão de ar, a 20°C e vazão de líquido de 200l/h 69

FIGURA 4.43 - Número adimensional $Q_L/(L^3 k_{ia})$ em função da vazão de ar, a 20°C e vazão de líquido de 300l/h 70

FIGURA 4.44 - Número adimensional $Q_L/(L^3 k_{ia})$ em função da vazão de ar, a 20°C e vazão de líquido de 400l/h 70

FIGURA 4.45 - Número adimensional $Q_L/(L^3 k_{ia})$ em função da vazão de ar, a 30°C e vazão de líquido de 200l/h 71

FIGURA 4.46 - Número adimensional $Q_L/(L^3 k_{ia})$ em função da vazão de ar, a 30°C e vazão de líquido de 300l/h 71

FIGURA 4.47 - Número adimensional $Q_L/(L^3 k_{ia})$ em função da vazão de ar, a 30°C e vazão de líquido de 400l/h 72

FIGURA 4.48 - Número adimensional $Q_L/(L^3 k_{ia})$ em função da vazão de ar, a 35°C e vazão de líquido de 200l/h 72

FIGURA 4.49 - Número adimensional $Q_L/(L^3 k_{ia})$ em função da vazão de ar, a 35°C e vazão de líquido de 300l/h 73

FIGURA 4.50 - Número adimensional $Q_L/(L^3 k_{ia})$ em função da vazão de ar, a 35°C e vazão de líquido de 400l/h 73

FIGURA 4.51 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ a 20°C e vazão de ar de 198,0ml/min..... 75

FIGURA 4.52 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ a 30°C e vazão de ar de 198,0ml/min..... 75

FIGURA 4.53 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ a 35°C e vazão de ar de 198,0ml/min..... 76

FIGURA 4.54 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ a 20°C e vazão de ar de 383,0ml/min..... 76

FIGURA 4.55 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ a 30°C e vazão de ar de 383,0ml/min..... 77

FIGURA 4.56 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ a 35°C e vazão de ar de 383,0ml/min..... 77

FIGURA 4.57 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ a 20°C e vazão de ar de 522,0ml/min..... 78

FIGURA 4.58 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ a 30°C e vazão de ar de 522,0ml/min..... 78

FIGURA 4.59 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ a 35°C e vazão de ar de 522,0ml/min..... 79

NOMENCLATURA

a - Área interfacial específica.....	$m^2 \cdot m^{-3}$
A - Área de seção transversal.....	m^2
C - Concentração de oxigênio.....	$kg \cdot m^{-3}$
C_i - Concentração de oxigênio na interface gás líquido.....	$kg \cdot m^{-3}$
C_s - Concentração de saturação.....	$kg \cdot m^{-3}$
c - Concentração do soluto na região líquida.....	$kg \cdot m^{-3}$
c_i - Concentração de soluto no líquido na interface.....	$kg \cdot m^{-3}$
c_g - Concentração de oxigênio.....	$kg \cdot m^{-3}$
c_{gi} - Concentração de oxigênio na interface.....	$kg \cdot m^{-3}$
c_l - Concentração de líquido.....	$kg \cdot m^{-3}$
c_{li} - Concentração de líquido na interface.....	$kg \cdot m^{-3}$
d - Altura da peça cisalhante.....	m
d' - Largura da peça cisalhante.....	mm
D - Diâmetro da garganta do venturi.....	mm
E - Energia.....	W
g - Aceleração gravitacional.....	$m \cdot s^{-2}$
H - Altura da coluna de líquido no reator <i>air-lift</i>	m
H^* - Constante de Henry.....	$(m^3 \cdot atm)/(kg \cdot mol)$
H_e - Número de Henry.....	adimensional
k_{1a} - Coeficiente global de transferência de massa.....	s^{-1}
k_g - Coeficiente de transferência de massa na face gasosa.....	$kgmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot atm^{-1}$
k_l - Coeficiente de transferência de massa na face líquida.....	$m \cdot s^{-1}$
L - Comprimento a partir da entrada de ar do venturi até a entrada no reator.....	m
L' - Comprimento da peça cisalhante.....	m

l - comprimento do venturi.....	m
N_A - Densidade de fluxo molar	$\text{kg mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
p - Pressão	atm
P_i - Pressão de oxigênio na interface gás-líquido	atm
p_i - Pressão parcial do soluto na interface	atm
P - Pressão parcial do soluto na região do gás	atm
P_m - Pressão ambiente	mmHg
P_v - Pressão de vapor da água.....	mmHg
P_M - Pressão da coluna de líquido	kgf cm^2
ΔP - Diferença de pressão	kgf cm^2
Pot - Potência da bomba.....	W
Q_A - Vazão de ar	ml min^{-1}
Q_L - Vazão de líquido	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
R - Constante universal dos gases	J (mol K)^{-1}
r - Taxa de transferência de oxigênio.....	$\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$
T - Temperatura.....	K
U - Velocidade	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
V - Volume	m^3
We - Número de Weber, $\left(\frac{\sigma_L}{d\rho_L U_L^2} \right)$	Adimensional
x - Fração molar do soluto no seio da fase gasosa	
y - Fração molar do soluto no seio da fase líquida	

Letras Gregas

ρ - Densidade.....	kg.m^{-3}
ρ_L - Densidade do líquido	kg.m^{-3}
μ_L - viscosidade do líquido	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
σ - Tensão superficial	N m^{-1}
ε_G - Coeficiente de retenção de gás	adimensional
η - coeficiente global	%
δ - espessura do filme	m
ϵ - Energia por unidade de volume.....	W m^{-3}

Sub-índices

- A - Fase gasosa
- c - Fase continua
- d- Descendência
- di - Fase dispersa
- i - Referente a interface
- L - Fase líquida
- G - Fase gasosa
- r - Ascendência

ABREVIACES

- PA – Presso Ambiente
- PC – Pea Cisalhante
- PCM – Peas Cisalhantes Menores
- PDB – Presso manomtrica depois da bomba

PDV – Pressão manométrica depois da bomba

R_G- Rotâmetro de gás

R_L- Rotâmetro de líquido

SPC – Sem Peça Cisalhante

TA – Temperatura Ambiente

TC – Trocador de calor

1 – INTRODUÇÃO

A transferência de oxigênio do ar para um líquido é muito importante em muitos casos de tratamento de águas residuárias, especialmente naqueles envolvendo atividade biológica. Em muitos processos fermentativos a taxa de produção global quase sempre é limitada pela transferência de oxigênio.

Os tratamentos biológicos de águas residuárias demandam sistemas de transferência de oxigênio com baixas potências requeridas, porém a solubilidade de oxigênio infelizmente é muito baixa, da ordem de 7 a 10 ppm para pressão e temperatura atmosférica, o que significa que pouco oxigênio pode ser transferido por um passo simples, através de um dispositivo de transferência, sendo que a maioria dos dispositivos envolvem um custo de capital elevado. Com o emprego de ar comprimido, a energia necessária para obter oxigênio do ar pode encarecer bastante o processo (JACKSON & COLLINS, 1964).

A utilização de distribuidores simples (tipo prato perfurado com orifício único ou orifícios múltiplos) em colunas de bolhas, usualmente não conduzem a altos valores dos coeficientes volumétricos de transferência de massa, o que é devido à baixa eficiência da dissipação de energia do ar comprimido, à inadequação do local escolhido para a distribuição de bolhas de ar e da pequena área interfacial formada entre a fase líquida e a fase gasosa. A eficiência de transferência de oxigênio atmosférico para a água, em equipamentos tipo Bernoulli, tem sido bastante estudada. Dispositivos como o ejetor, a placa de orifício e o venturi, produzem a aspiração do ar atmosférico através da garganta destes equipamentos, promovendo o contato entre a fase líquida e a fase gasosa (JACKSON & COLLINS, 1964).

Os ejetores conduzem a maiores coeficientes de transferência de massa em relação aos demais dispositivos tipo Bernoulli. Entretanto, comparando os ejetores com os outros equipamentos convencionais, operando em condições similares, ele conduzem a um maior consumo de energia, devido às suas características hidráulicas, sendo o venturi um dispositivo de transferência de oxigênio mais econômico (ECKENFELDER, 1956).

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – HISTÓRICO

A eficiência da dispersão de gases em líquidos é consideravelmente importante em muitos processos de engenharia química, da engenharia bioquímica e sistemas de tratamento de águas residuárias.

Uma grande produção de proteína e o tratamento de águas residuárias necessitam de reatores grandes, onde a utilização de agitadores mecânicos convencionais não são eficientes com relação à utilização de energia. Devido aos elevados custos dos agitadores mecânicos convencionais, em todos os processos de aeração, outros dispositivos foram testados. Estudos utilizando venturi acoplados em reatores foram realizados por JACKSON & COLLINS (1964) (VOLMULLER e VALBURG (1973), NAGEL (1970), HIRNER e BLENKE (1977) e ZEHNER (1975) estudaram reatores com jato. Ejetores foram estudados por PAL et al. (1980) e por ZIEGLER et al. (1977), acoplados em reatores tubulares com reciclo, todos citados por JACKSON & COLLINS (1964)). Nestes sistemas, a energia cinética do jato em alta velocidade foi utilizada para aumentar a área interfacial entre as fases líquida e gasosa. Em 1980, ZLOKARNIK realizou experimentos onde a eficiência de absorção de oxigênio foi de 3,8 kgO₂/kWh com uso de ejtores, resultado bastante satisfatório quando comparado com 0,8 kgO₂/kWh obtido em reatores convencionais (RADHAKRISHNAN & MITRA, 1984).

2.2 – AERADORES

Em muitos processos químicos/fermentativos onde a dissolução do oxigênio do ar é necessária, a taxa de produção global quase sempre é limitada pela transferência de oxigênio ao líquido, sendo este tema, objeto de muitas pesquisas com a finalidade de melhorar tais processo.

2.2.1 - TIPOS DE AERADORES

Vários sistemas de aeração são utilizados no projeto de processos de tratamentos de águas residuárias. Dois métodos básicos de aeração de águas residuárias são: 1) Introduzir ar ou oxigênio dentro da água residuária com difusores submersos ou outros dispositivos de aeração e 2) Agitação mecânica da água residuária que promove dissolução do oxigênio do ar atmosférico.

Alguns dispositivos de aeração:

1 - *Dispositivo de aspiração* - Consiste de uma bomba propulsora inclinada montada na superfície de uma lagoa ou tanque de tratamento, conforme mostra a Figura 2.1, que succiona ar e descarrega a mistura ar/água abaixo da superfície da água. Este dispositivo apresenta uma baixa eficiência de transferência de oxigênio.

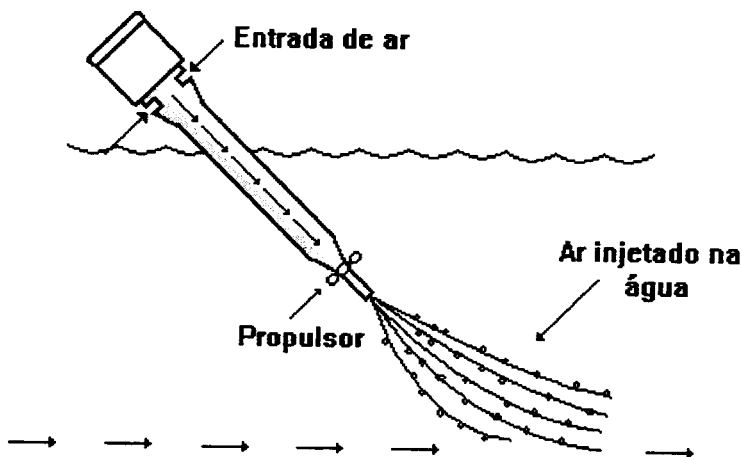


Figura 2.1 - Dispositivo de aspiração de ar atmosférico.

2 - *Tubos estáticos* - Consiste em um ou mais tubos montados num tanque fundo, conforme mostra a Figura 2.2, que aera e promove a mistura porém possui uma baixa transferência de oxigênio.

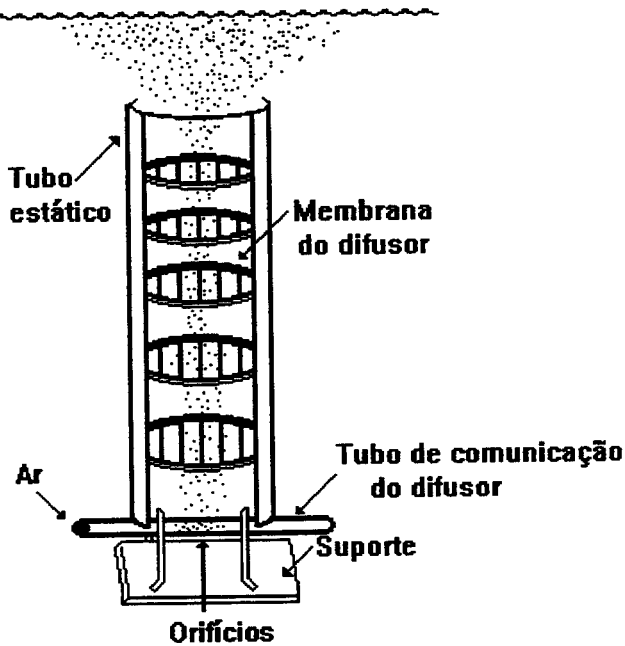


Figura 2.2 - Tubos estáticos.

3 - *Difusor de disco* - Consiste em discos de cerâmica rígidos ou membrana porosa flexível montados sobre tubos de distribuição de ar perto do fundo do tanque, conforme mostra a Figura 2.3. A eficiência de transferência de oxigênio é alta.

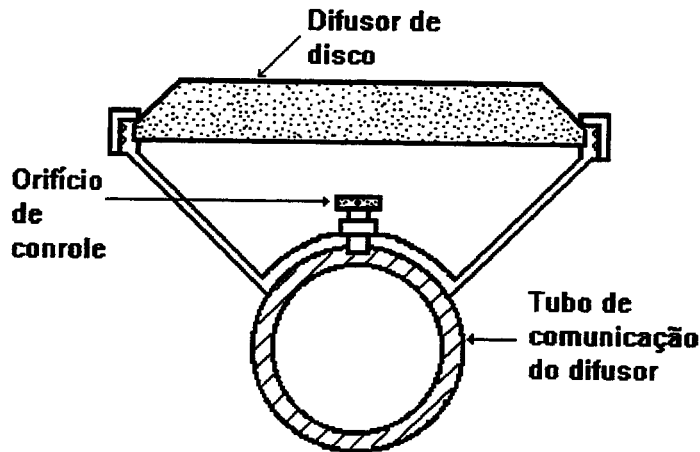


Figura 2.3 - Difusor de disco.

4 - *Venturi* - É um dispositivo medidor de vazão e aerador. Como aerador o venturi é responsável pela sucção de ar e promoção de sua mistura no líquido em forma de pequenas bolhas. Um medidor Venturi é composto de um bocal, seguido de um conduto de diâmetro constante (garganta) e, em seguida, de um cone gradualmente divergente. A área da garganta sendo pequena, resulta em uma alta velocidade do líquido, seguido de um decréscimo correspondente na pressão estática, o que permite a utilização do Venturi como um dispositivo de medição de fluxo. O projeto de um Venturi para succionar ar, utiliza como critério a obtenção de uma pressão inferior à atmosférica. Os furos existentes na parede da garganta proporcionam a sucção de ar ou outro gás, devido à diferença de pressão. A figura 2.4 mostra um venturi.

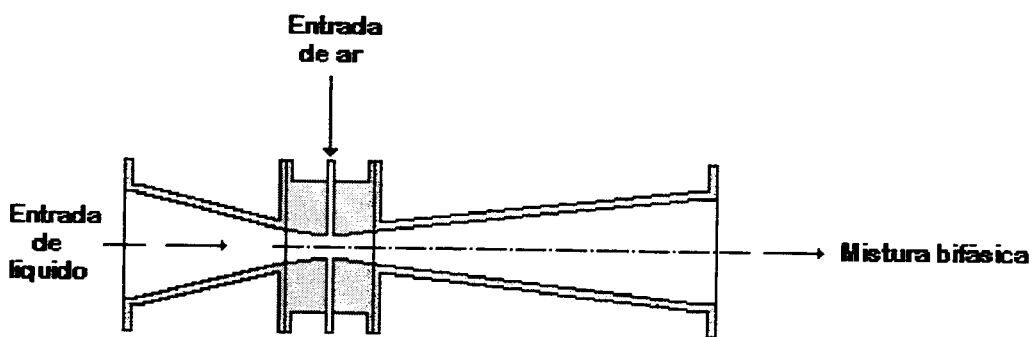


Figura 2.4 - Dispositivo Venturi

5 – *Ejetores* - São dispositivos que utilizam a energia cinética de um jato de líquido a alta velocidade para conduzir, dispersar e dissolver gases em líquidos, apresentado na figura 2.5.

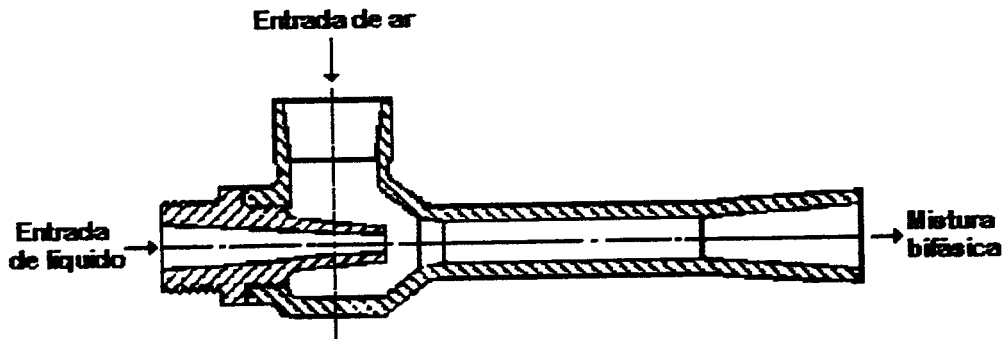


Figura 2.5 – Ejetor

A TABELA 2.1 apresenta a eficiência de transferência de oxigênio observada em alguns sistemas de aeração de efluentes (METCALF & EDDY, 1987).

TABELA 2.1 - Eficiência de transferência para diferentes sistemas de aeração

Sistema de aeração	Eficiência de transferência (kgO ₂ /kwh)	
	Condição padrão*	Prática industrial**
Aerador superficial de baixa velocidade	1,23 – 3,08	0,71 – 1,48
Aerador superficial de baixa velocidade com tubo aspirador (estático)	1,23 – 2,83	0,74 – 1,29
Aerador superficial de alta velocidade	1,23 – 2,22	0,74 – 1,23
Aerador superficial com turbina descendente	1,23 – 2,47	0,62 – 1,05
Com turbina aspersora	1,23 – 2,03	0,74 – 0,94
Com agitação submersa	1,23 – 2,47	0,74 – 1,11
Aerador tipo escova rotativa	0,92 – 2,22	0,49 – 1,11

(*) sistema – água da torneira, T = 20°C e C_A= 0

(**) T = 15°C e altitude de 150m em relação ao nível do mar.

2.3 – REATORES ACOPLADOS COM DISPOSITIVOS DE AERAÇÃO

JACKSON & COLLINS (1964), fizeram um estudo de dois aeradores tipo venturi, onde foram comparadas as perdas de energia e as características de transferência de oxigênio. A proporção, entre os Venturis, de similaridade geométrica foi 5 e a de capacidade de escoamento de água foi 25. As concentrações de oxigênio foram medidas através de um eletrodo, sendo que sulfito de sódio foi utilizado para retirar totalmente o oxigênio da água. De acordo com HOLTHOFT et al. (1941), citado por JACKSON & COLLINS (1964), sulfito e sulfato em concentrações baixas não interferem nas análises polarográficas devido ao fato de alterarem a tensão superficial do líquido. O melhor desempenho do maior dispositivo foi observada para vazões baixas de água. Para uma vazão de 86 galões por minuto a taxa de transferência de oxigênio foi de 0,86 kgO₂/ kWh, entretanto o venturi menor transferiu 4 vezes esta quantidade de oxigênio por unidade de HP-hora. O menor venturi possuía uma entrada nominal de 0,75" e diâmetro da garganta de 0,25".

Para absorção de oxigênio em água a equação da taxa de oxigênio (r) pode ser escrita em termos do coeficiente de transferência global do líquido (MEITES (1955), citado por JACKSON & COLLINS (1964))

$$r = k_{La} (C_S - C)_{MÉDIO} \quad (1)$$

Uma base apropriada é a taxa de transferência de oxigênio por unidade de energia, que é função do próprio dispositivo, da temperatura, da pressão, e do gradiente de concentração do oxigênio. WESTON (1961), citado por JACKSON & COLLINS (1964), propôs que a água a 20°C com quantidade nula de oxigênio dissolvido e pressão do ar a 760mmHg fossem as condições padrão, nas quais as comparações devem ser feitas. A energia a ser considerada é aquela fornecida ao dispositivo de transferência, e não ao propulsor (bomba). Maiores consumos de energia serão sempre requeridos na prática devido as perdas na fonte de força, perdas na tubulação, e presença de oxigênio dissolvido na água em quantidades variáveis.

A quantidade real de energia gasta no aerador venturi é calculada por:

$$\frac{kg.O_2}{kWh} = 0.217 \frac{(k_1 a) C_s}{\Delta P \cdot Q_L} \quad (2)$$

A determinação da solubilidade e da difusividade de um ou de vários solutos em uma reação com cinética desconhecida é complicada, e em reatores industriais somam-se os custos e o tempo dispendido nos experimentos. Estas dificuldades tem justificado a idéia de construir modelos laboratoriais simples com áreas interfaciais e tempos de contato da fase líquido-gás bem definidos e fazer experimentos para obter informação de maneira que possa ser aplicado diretamente em um projeto. LAURENT et al. (1980) fizeram uma simulação em escala piloto a partir de um modelo de escala laboratorial, utilizando um *Venturi Jet Scrubber*. Um venturi de 50 mm de diâmetro com a garganta de 33mm e comprimento 700 mm foi analisado para 3 bocais ejetores de 3, 4 e 5 mm de diâmetro. O critério de similaridade A/V_L não pode ser cumprido com jato um laminar. O $k_1 a$ foi determinado pelo método da absorção de dióxido sulfúrico diluído (1%) com ar em solução de hidróxido de sódio. Estes autores observaram a possibilidade de obter simultaneamente os mesmos valores de k_1 e k_g em ambos equipamentos, devido ao fato desses parâmetros serem principalmente influenciados pela vazão de líquido.

DUTTA & RAGHAVAN (1987) estudaram a transferência de massa e as características hidrodinâmicas de um reator (vidro cilíndrico) com reciclo realizado por uma bomba, utilizando ejetores de jato líquido com escoamento descendente com garganta do tipo reta e venturi. A taxa de ar succionado pelo jato de líquido e o coeficiente de retenção de gás demonstraram ser função da potência do jato do fluido motriz por unidade de volume do líquido, assim como a área interfacial e o coeficiente de transferência de massa volumétrico. Estes autores mediram o diâmetro de bolha através de fotografias feitas no reator, onde os diâmetros variaram de 1-3 mm e 2-5 mm para maiores e menores taxas de recirculação respectivamente. As áreas interfaciais obtidas com ejedor venturi demonstraram ser superiores às obtidas com ejedor de garganta reta.

SOLFRANK, B. & SOMMER, K (1989) estudaram a eficiência da separação de sólidos suspensos do mosto de cerveja com vários sistemas de aeração. A distribuição do tamanho da partícula sólida no mosto foi caracterizado através de um sedígrafo a laser, onde todas as partículas eram menores que 30 (μm), e 50% eram inferiores 9 (μm). Através de cálculos, observou-se que a sedimentação não é um método viável para separação de sólidos suspensos, uma vez que os tempos de sedimentação variam de 450 a 40000 horas, razão pela qual investigaram a possibilidade de separação de sólidos suspensos por um processo de flotação. Os sistemas de aeração utilizados foram: vela cerâmica porosa, tubo venturi e misturador estático. Os resultados não foram satisfatórios, pois não houve decréscimo significativo no conteúdo de sólidos suspensos do mosto em nenhum dos sistemas de aeração.

CHUGH & KUMAR (1984) estudaram o desempenho de um exaustor secador de pulverização projetado com um lavador tipo venturi em um laboratório de laticínios aplicado na recuperação de calor e partículas sólidas. Os resultados demonstraram que a recuperação de sólidos foi de 80 a 90% e a recuperação de calor foi de 6 a 10 % para uma razão líquido/ar de exaustão de 0,24 a 0,35 l/m^3 . Foi verificado que o aumento na recuperação de calor e de partículas sólidas é diretamente proporcional ao aumento da vazão do líquido.

PINEDO (1995) desenvolveram um reator de recirculação para hidrogenação de óleos vegetais. O sistema constitui-se de um reator (conversor cilíndrico), bomba de diafragma para recirculação da suspensão catalítica, trocador de calor para aquecimento e/ou resfriamento e ejetor tipo venturi para succionar e misturar as fases reagentes, assegurando uma mistura contínua e uniforme das fases envolvidas no processo (gás, líquido e sólido) e dispensando o uso de um agitador mecânico. Estes autores observaram que aumentando a vazão de recirculação da suspensão, a sucção de gás aumentava, melhorando a mistura das fases envolvidas.

DIRIX & WIELE (1990) estudaram a transferência de massa em um reator com reciclo acoplado em um ejetor. O sistema era constituído de um tanque de

retenção onde a água era previamente saturada com oxigênio e em seguida enviada, através de uma bomba, ao reator com um ejetor acoplado, após o qual o líquido retornava ao tanque de retenção, fechando o ciclo. A transferência de massa foi determinada no reator e no ejetor separadamente, onde constataram que este processo tratava-se de dois reatores em série, o que requeria a modelagem separadamente, sendo a transferência de massa do sistema influenciada pelo regime de escoamento. Os seus experimentos mostraram que existem dois regimes de escoamento diferentes em um ejetor venturi operando com altas velocidades de líquidos. No caso de baixa razão entre as vazões gás/líquido, ocorre escoamento bifásico caracterizado pela formação de pequenas bolhas de gás na fase líquida, movendo-se uniformemente para baixo através de um tubo difusor. Para altas taxas de escoamento de gás acontece uma transição de escoamento de bolhas para o escoamento tipo do jato. A concentração de oxigênio foi medida utilizando um eletrodo polarográfico, porém os autores comentaram sobre a importância do sensor de oxigênio não ficar em contato direto com bolhas de ar para não atrapalhar a determinação da concentração de oxigênio.

CRAMERS et al. (1992a) estudaram as características hidrodinâmicas e de transferência de massa de um reator acoplado a um ejetor. Para a determinação do coeficiente de transferência de massa foi utilizado o método de oxidação de sulfito (cobalto como catalisador) e verificaram que a transferência era influenciada pela vazão de líquido no ejetor. Como DIRIX & WIELE (1990), CRAMERS et al. (1992) também concluíram, ao verificar as características de transferência de massa no reator e no ejetor, que se tratavam de dois reatores em série. O projeto consistia de um reator de 1,5 m de altura e 30 cm de diâmetro, uma bomba para recirculação, um trocador de calor e um ejetor colocado no topo do reator. Dois regimes de escoamento diferentes foram observados no ejetor, dependendo da razão entre as vazões gás-líquido. Verificou-se que o reator pode ser dividido em duas zonas, quanto a característica física do líquido no seu interior: dispersão líquido-gás e líquido claro. A altura do líquido claro diminuiu com o aumento da velocidade do líquido no ejetor. O regime de escoamento no ejetor teve efeito significativo sobre a hidrodinâmica do reator principal. Estes autores concluíram que as vazões de gás e de líquido

influenciaram diretamente na área específica global e o coeficiente de retenção de gás e verificaram que estes aumentaram com o aumento da vazão do gás e do líquido. A área interfacial específica, no ejetor, varia com a velocidade do jato e com a razão gás-líquido, enquanto no reator principal a área interfacial específica demonstrou ser influenciada apenas pela vazão de gás.

De acordo com LEVICH (1962) citado por CRAMERS et al. (1992) o diâmetro de bolha pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$d_{\max} = \left[\frac{We}{2} \right]^{0,6} \frac{\sigma^{0,6}}{(\rho_c^2 \cdot \rho_{di})^{0,2}} \epsilon^{0,4} \quad (3)$$

onde:

$$\epsilon = \frac{E_{JATO}}{(\rho_L \cdot V)} \quad (4)$$

$$e \ E_{JATO} = 0,5 \cdot \rho_L \cdot (U_{JATO})^2 \cdot Q_L \quad (5)$$

CRAMERS et al. (1992b) estudaram as características hidrodinâmicas do reator acoplado a um venturi num processo com reciclo e concluíram que a taxa de gás succionado pelo fluido e o coeficiente de retenção de gás (ϵ_G) o reator foram influenciados pela densidade do gás. O aumento da quantidade de gás succionado ocorre com o aumento da densidade, explicado através da instabilidade de Kelvin-Helmholtz. Conforme a equação, mostrada a seguir, aumentando a densidade do gás o coeficiente de retenção de gás aumenta no reator principal. A correlação abaixo foi derivada a partir dos dados experimentais.

$$\epsilon_G = 7,7 \cdot U_G \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right) \quad (6)$$

Os resultados anteriores foram obtidos utilizando as seguintes condições: $0,02 < U_G < 0,1$ m/s, $0,18 < \rho_G < 6,18$ kg/m³ e $\rho_L = 1000$ kg/m³. O aumento da quantidade de

gás succionado e do coeficiente de retenção de gás proporciona maior transferência de oxigênio.

BANDO et al. (1990) estudaram as características de escoamento de uma coluna de bolhas com sucção a gás através de um bico de injeção gás-líquido do tipo air-lift. A vazão de gás na sucção e o coeficiente de retenção de gás aumentaram com o aumento da vazão de líquido. Em seus experimentos as dimensões ótimas de montagem do bocal relativo à taxa de sucção de gás foram: a relação comprimento/diâmetro do bocal = 20 a 30, e (diâmetro do orifício)/ (diâmetro do bocal) = 0,5 a 0,6. A taxa de sucção do gás por unidade de energia aumentou com o aumento do diâmetro do bocal acima de 30 mm, enquanto que o diâmetro ótimo do bocal para o valor máximo do coeficiente de retenção de gás variou com as condições de operação. Regiões com escoamento turbulento e laminar foram observadas tanto na coluna como no bocal *air-lift*. O coeficiente de retenção de gás e a área interfacial específica gás-líquido foram tanto maiores quanto menores foram os diâmetros das bolhas. Estes autores observaram que a eficiência de transferência de oxigênio foi maior com o bico de injeção para a sucção de gás, quando comparada com o bico tipo air-lift.

MORESI et al. (1983) estudaram as características de um fermentador com ejeter em loop. O equipamento do processo consistia de uma torre de fermentação com loop externo, uma bomba centrífuga, um trocador de calor, e uma bomba centrífuga e um ejeter líquido-gás. A aeração foi obtida através da recirculação contínua do meio de fermentação através de dois bocais diferentes, substituindo o compressor de ar tradicional. Estes autores utilizaram *Kluyveromyces fragilis* como microrganismo de teste na fermentação de soro de leite coalhado. Foi verificado tanto no fermentador com ejeter em loop quanto no fermentador tradicional que as altas forças cisalhantes e as colisões no processo de mistura, observadas nas seções do bico ejeter e do difusor, não afetam o crescimento microbiano. Dentro da faixa experimental de consumo de energia por unidade de volume (0,1 - 5 kW/m³), a eficiência de transferência de oxigênio do fermentador com ejeter em loop por unidade de energia de entrada variou de 1 a 2,5 kgO₂/ kWh. Verificaram, ainda, que

esta performance pode ser melhorada alterando o projeto do dispositivo de aeração, devido ao fato que o consumo de energia por unidade de volume em um bocal de 4mm foi cerca de 40% menor que em um bico de 6mm .

MOHAMED & JAMESON (1993) estudaram a hidrodinâmica de um indutor jato radial. O jato de água de líquido escoava contra uma placa e espalha-se radialmente como uma camada fina, movendo-se rapidamente no estreito espaço entre dois discos paralelos, acompanhado de um fino filme de gás. Em um certo ponto a camada líquida subitamente aumenta de espessura e quebra a camada de gás. Os resultados experimentais foram comparados com a teoria, onde foi verificado que estes permaneceram dentro das expectativas.

PROKOP et al. (1983) estudaram a hidrodinâmica, a transferência de massa e o comportamento da cultura de levedura em um bioreator de coluna com ejetor que foi testada devido ao seu desempenho hidráulico e biológico, isto é, devido a eficiência de mistura sem causar lise celular. O coeficiente de difusão axial da fase líquida na presença de eletrólitos e etanol foi medido através da técnica de resposta a estímulos com uma subsequente avaliação do modelo de difusão. Ao contrário das colunas de bolhas comuns, o coeficiente de mistura axial é inversamente dependente da velocidade superficial do ar, porque a velocidade do líquido atua em um sentido oposto ao fluxo de ar na coluna. A medição do coeficiente de transferência volumétrico de oxigênio na presença de eletrólitos e etanol foi feita através de um método dinâmico "gassing-in", adaptado para a coluna. Os dados foram correlacionados com as velocidades superficial do ar e do líquido, energia total de entrada e energia para aeração e mistura. O crescimento da *Candida utilis* em etanol alcançou uma produtividade de biomassa de $2,5 \text{ g l}^{-1}\text{h}^{-1}$, o que comprovou a capacidade de transferência da coluna. Colunas alimentadas com gás com energia pneumática e/ou hidráulica podem ser utilizadas para fermentações aeróbicas, considerando sua transferência de massa e as características de mistura.

RADHAKRISHNAN & MITRA em 1984 estudaram a pressão da bolha, o coeficiente de retenção de gás (ϵ_G) e a área interfacial em fluxo vertical bifásico de

dispersores induzidos com ejedor multijato. Eles concluíram que a pressão da gota, em bocais com geometrias diferentes, é função da vazão do gás e do líquido. Com o aumento da vazão, a pressão da gota diminuiu devido ao aumento do ε_G . A área interfacial aumenta com o aumento do fluxo secundário. Ele compararam a eficiência de energia para a geração da área interfacial entre ejedor de jato múltiplo e ejedor de jato simples e verificaram a melhor performance no ejedor de jato múltiplo.

2.4 – Reatores “Air-Lift”

O tamanho das bolhas é uma característica importante dos diferentes tipos de sistemas de aeração para tratamento de águas residuárias. Reatores *air-lift* pertencem a uma classe especial de reatores pneumáticos, os quais têm recebido uma atenção especial para aplicação em vários sistemas de fermentação. A alta circulação de líquido tem mostrado dar vantagens adicionais a eles, como por exemplo, o aumento da transferência de calor e a homogeneidade do meio. A maioria dos trabalhos trata somente do tamanho e do tipo de reator *air-lift* com um ou dois parâmetros, como coeficiente de retenção de gás e a circulação de líquido que são os dois parâmetros mais importantes na caracterização hidrodinâmica de reatores de coluna agitados pneumaticamente e na caracterização da transferência de massa e de calor na coluna. A análise hidrodinâmica dos reatores *air-lift* fica difícil, já que estes dois parâmetros são interdependentes e não podem ser preditos separadamente. As características hidrodinâmicas da coluna de bolhas e do reator *air-lift* dependem do regime do escoamento que ocorre na coluna. Se a velocidade superficial do gás for relativamente baixa e com uma distribuição uniforme de bolhas pequenas e se estas subirem na coluna com pequenas interações entre si, o regime de escoamento será chamado de borbulhamento homogêneo. Este tipo de escoamento é desejável, particularmente em situações onde a transferência de massa gás-líquido é importante devido a maior área de contato das bolhas com o líquido. Muitos reatores *air-lift* industriais operam nestas condições, na qual a vazão de gás é também alta para manter o escoamento de bolhas. A coalescência de bolhas resulta na distribuição de pequenas e grandes bolhas ao longo da coluna. Existem várias dificuldades experimentais relativas à obtenção de resultados em colunas de bolhas e em reatores

air-lift: presença de qualquer impureza na água, causando erro significativo na medida da velocidade; adição de sal, podendo aumentar o coeficiente de retenção de gás de 20 a 200% e a velocidade é função da temperatura e da densidade do líquido.

GHOSH & BHATTACHARYYA (1993) estudaram o efeito da concentração de oxigênio em meio de cultivo de leveduras de pão em um fermentador *air-lift* com o tubo de forma convergente-divergente, e compararam os resultados com os obtidos em reatores *air-lift* convencionais de tubos cilíndricos. A taxa de diluição variou de 0,08 até 0,165 h⁻¹ e a concentração de açúcar foi mantida abaixo de 0,15 g/l. A concentração de oxigênio foi mantida a 50% da concentração de saturação durante a fermentação e a concentração de oxigênio da corrente de ar adicionada variou de 21 até 60% . A concentração de massa celular aumentou 30% para a concentração de oxigênio no ar de 60%. Estes autores concluíram que a combinação da configuração do tubo convergente-divergente com o enriquecimento de oxigênio proporcionou um aumento na concentração de massa celular em relação aos reatores *air-lift* convencionais, como consequência da maior transferência de oxigênio para o líquido.

STEJSKAL & POTUCEK (1984) desenvolveram um reator *air-lift* de tubos concêntricos, e foi operado com água e solução de poliacrilamida. O k_{ia} foi medido com e sem a utilização de misturadores estáticos inseridos no tubo do centro, onde o ar era aspergido, tendo aumentado com o aumento da velocidade do ar e também com a presença dos misturadores estáticos, porém, estes causaram aumento na energia requerida. A relação funcional entre o k_{ia} e a velocidade do ar foi linear, sendo que o k_{ia} e coeficiente de retenção de gás decresceram com o aumento da viscosidade do líquido.

SHAMLOU et al. (1993) estudaram a variação do coeficiente de retenção de gás e a taxa de circulação de líquido em reatores *air-lift* na fermentação de um fluido newtoniano com cultura de *Saccharomyces cerevisiae* e na fermentação de um fluido não-newtoniano com cultura de *Saccharopolyspora erythraea*. O aumento do parâmetro ε_G foi observado para velocidades do gás maiores que 0,2 m/s, devido à mudança hidrodinâmica do escoamento na coluna. Os dados experimentais indicaram

que não existe um ponto definido que indique mudança do regime do escoamento. Como a velocidade do gás aumenta gradualmente, o coeficiente de retenção de gás e a circulação de líquido tornaram-se progressivamente menos sensíveis para a vazão de gás, indicando uma mudança no regime do escoamento.

SIEGEL & MERCHUK (1987) estudaram a transferência de massa em reatores *air-lift* de diferentes geometrias e vazões de gás.

SIEGEL et al. (1994) estudaram a variação do coeficiente de retenção de gás, a transferência de oxigênio e a eficiência de tratamento de águas residuárias em um reator *air-lift* para verificar o seu potencial no processo de tratamento de águas residuárias. Utilizaram água residuária sintética como substrato com DQO de aproximadamente 1050 mg/l. O processo foi conduzido em um reator operado com abastecimento em batelada com capacidade de 200 litros. A alimentação ocorreu com escoamento ascendente de águas residuárias provenientes de um esgoto coletivo, sendo que os resultados foram satisfatórios devido à baixa energia requerida, com redução de 99% da DQO. Um separador gás-líquido influenciou significativamente na eficiência deste reator.

GASNER (1974) desenvolveu um reator *air-lift* cilíndrico concêntrico e comparou com outros reatores convencionais de sistemas de tratamento de águas residuárias. Observou que no reator *air-lift* ocorreu decréscimo na coalescência das bolhas, aumento do número de bolhas arrastadas pelo fluido, diminuição da energia gasta, aumento na transferência de massa e a diminuição nos custos. Este autor estimou que o coeficiente de transferência de oxigênio poderia chegar a 140 mmol O₂/(l h), aumentando a velocidade do ar e evitando a coalescência das bolhas. O coeficiente de transferência de oxigênio obtido em tratamentos convencionais de águas residuárias por lodo ativado é de aproximadamente 0,25 mmol O₂/(l h).

BELLO et al. (1985) fizeram um estudo comparativo entre dois tipos de reatores *air-lift* de tubos concêntricos, onde o coeficiente de retenção de gás (ϵ_G) e o coeficiente de transferência de massa global (k_{La}) foram analisados. Os resultados foram comparados e contrastados para os dois tipos de reatores *air-lift* e também com

os resultados correspondentes a uma coluna de bolhas (A_d/A_r). Os parâmetros ε_G e $k_L a$ aumentaram com o aumento da velocidade do gás e da sua correspondente força de entrada, mas decresceram com o aumento da velocidade do líquido circulante. Para prever o desempenho da coluna de bolhas e dos reatores *air-lift* é necessário informações sobre o ε_G e sobre a taxa de circulação de fluido na coluna.

HEIJNEN et al. (1992) estudaram o tratamento de águas residuárias utilizando um reator *air-lift* com lodo imobilizado em partículas sólidas (raio = 0,1 mm) com uma vazão elevada de água residuária e verificaram o efeito de características de partícula e tempo de retenção hidráulico na formação do biofilme. As partículas pequenas e ásperas demonstraram a melhor formação de biofilme. Os baixos tempos de retenção demonstraram favorecer a melhor formação de biofilme, o que resultou num crescimento maior sob estas condições. Para altos tempos de retenção, as partículas eram lavadas, impedindo a formação do biofilme nas mesmas. O efeito da separação do biofilme tornou-se distinto a partir da observação de que a maioria dos microrganismos do biofilme é transferido para o líquido. Conclui-se que o processo de formação do biofilme é constituído de três fases: formação de microcolônias a partir de células simples; formação de pequenos biofilmes a partir de microcolônias e desenvolvimento do biofilme.

2.4.1 – Reatores “Air-Lift” acoplados com dispositivos tipo “Bernoulli”

DUSSAP & GROS (1982) analisaram o consumo de energia e a eficiência de aeração em fermentador *air-lift* cilíndrico concêntrico com bico ejetor localizado na base do tubo central. A energia requerida demonstrou ser menor quando comparada com o fermentador agitado e aerado convencionalmente. A taxa de transferência de oxigênio foi determinada pela técnica da oxidação do sulfito de sódio, utilizando cobalto como catalisador. A área interfacial específica demonstrou ser dependente da energia aplicada.

2.5 – TRANSFERÊNCIA DE MASSA

A transferência de oxigênio a partir do ar é importante em muitos processos de tratamento de águas residuárias e também em processo industriais, principalmente aqueles que envolvem atividade biológica. A solubilidade do oxigênio é muito baixa, da ordem de 7 a 10 ppm em temperaturas e pressões ambientes, quando dispositivos convencionais são utilizados.

2.5.1 – Princípios de Transferência de Massa

Quando um gás é transferido para um líquido através de uma interface que as separam, a resistência de transferência de massa em cada fase causa um gradiente de concentração como mostra a figura 2.6 (PERRY'S, 1986, cap. 14)

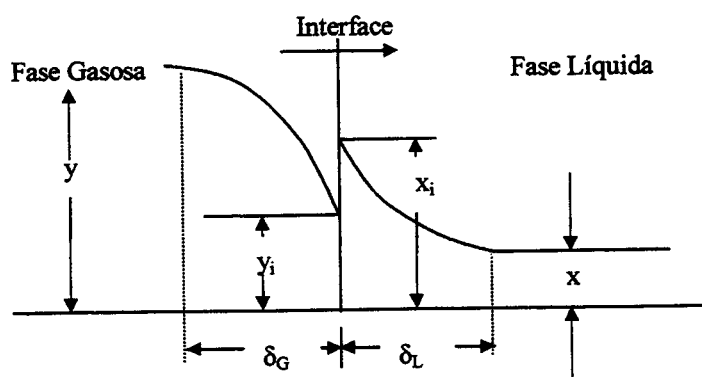


FIGURA 2.6 – Gradiente das concentrações próximo à interface Gás-Líquido. (PERRY'S, 1986)

A concentração do material difundido nas duas fases adjacentes à interface geralmente são desiguais e relacionadas cada uma com a lei do equilíbrio de fases termodinâmico.

Para o sistema no qual as concentrações do soluto nas fases gasosa e líquida são diluídas, a taxa de transferência pode ser expressa pela equação que prediz que a taxa de transferência de massa é proporcional à diferença entre a concentração da solução e na interface gás-líquido. Portanto:

$$N_A = k_G(p - p_i) = k_L(c_i - c) \quad (7)$$

onde N_A é densidade de fluxo molar

2.5.2 - Transferência de Massa Gás-Líquido em Sistemas Celulares

De acordo com BAILEY & OLLIS (1986), um gás solúvel, geralmente oxigênio, é transferido a partir da fonte, como bolhas de ar subindo dentro da fase líquida contendo células. O oxigênio necessita passar por uma série de resistências de transporte, cujas magnitudes relativas dependem da hidrodinâmica da bolha, temperatura, densidade e atividade celular, composição da solução, fenômeno interfacial e outros fatores.

As diferentes resistências descritas abaixo são mostradas na figura 2.7:

- 1- Difusão a partir do volume de gás para a interface gás líquido;
- 2- Movimento através da interface gás-líquido;
- 3- Difusão de um soluto através de uma região líquida não misturada, adjacente a uma bolha dentro de volume líquido bem misturado;
- 4- Transporte de um soluto através do volume líquido para a segunda região líquida não misturada em torno da célula;
- 5- Transporte através da segunda região líquida não misturada, associada com as células;
- 6- Transporte difusivo dentro do floco celular, micélio ou partícula;
- 7- Transporte através do envoltório da célula e para o local de reação intracelular.

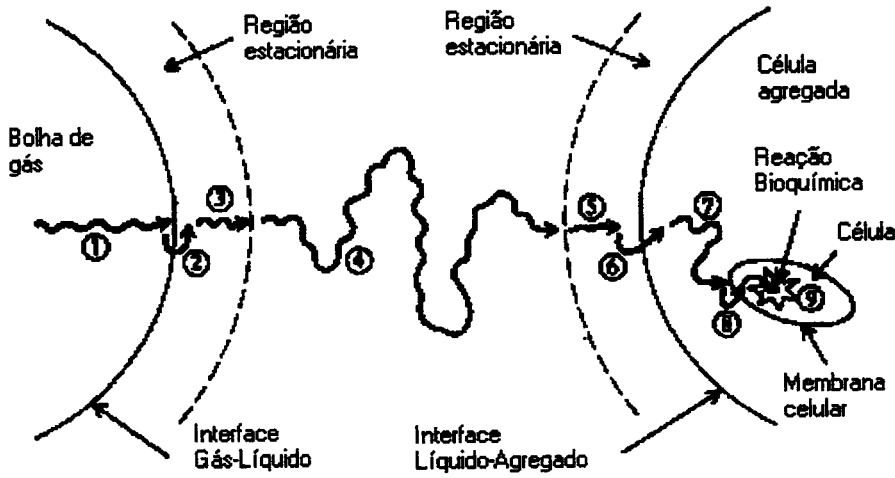


FIGURA 2.7 – Resistências de transferência de oxigênio em sistemas celulares

Quando o organismo tem a forma de células individuais, a Sexta resistência desaparece. Células microbianas por si mesmas possuem algumas tendências em adsorver as interfaces. Desta forma, provavelmente as células juntam-se preferencialmente nas vizinhanças da interface gás-líquido e o oxigênio em difusão passa através de uma porção de líquido onde não há mistura apenas uma região líquida. Nesta situação, a concentração de oxigênio dissolvido no líquido não é suficiente para suprir a respiração do micróbio. Similarmente na utilização de outros substratos solúveis, tais como gotas de hidrocarboneto, a adsorção de células sobre ou perto da interface da emulsão hidrocarboneto tem sido observada.

Em um estado estacionário, a taxa de transferência de oxigênio na interface gás-líquido é igual à taxa de transferência através do filme do lado líquido. Considerando c_g e c_l sendo as concentrações de oxigênio no gás e no líquido respectivamente podemos escrever a taxa de transferência por meio das seguintes equações igual:

$$N_A = \text{kg mol O}_2/\text{m}^2.\text{s} = k_g(c_g - c_{gi}) \quad (\text{lado do gás}) \quad (8)$$

$$N_A = \text{kg mol O}_2/\text{m}^2.\text{s} = k_l(c_{li} - c_l) \quad (\text{lado do líquido}) \quad (9)$$

Uma vez que as concentrações interfaciais não são acessível usualmente em medidas de transferência de massa, freqüentemente são usadas expressões de transferência

de massa em termos do coeficiente de transferência de massa global k_a e a diferença de concentração global ($c_l^* - c_l$), onde c_l^* é a concentração da fase líquida em equilíbrio com a pressão parcial de oxigênio na fase gasosa.

$$H c_l^* = c_g \quad (10)$$

$$\text{onde } H = H'/(RT) \text{ e } H' = P_A C_G$$

Em termos destas quantidades globais, a densidade de fluxo de soluto é dado por:

$$N = k_a(c_l^* - c_l) \quad (11)$$

3 – MATERIAL E MÉTODOS

3.1 – Construção e Funcionamento do Equipamento e Acessórios

A figura 3.1 apresenta um fluxograma do sistema experimental proposto para a realização dos experimentos. O equipamento foi montado na Planta Piloto do Departamento de Engenharia de Alimentos (DEA), da Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA) da UNICAMP.

Um volume de 6,5 litros de solução era colocado no sistema e o ar era aspirado através do tubo venturi. De acordo com o esquema apresentado, o fluido primário era transportado por uma bomba centrífuga (DANCOR modelo D-56 1295, eixo em aço inoxidável com potência de 1 HP e 3520 RPM/110 V - Brasil), cuja vazão foi controlada manualmente pela válvula V_1 (tipo globo de $\frac{1}{2}$ " com corpo em bronze e vedação em teflon). As medidas de vazões de líquido e gás foram realizadas, respectivamente, pelos rotâmetros R_L (GILMONT modelo PF 010, faixa de vazão de 0 a 1000 l/h) e R_G (GILMONT modelo NO 12-10, faixa de vazão de 45 a 522 ml/min).

A pressão estática do líquido foi medida depois da bomba e depois do venturi pelos manômetros M_1 (RECORD tipo Bourdon, corpo em bronze e escala de 0 a 7 kgf/cm²) e M_2 (WIKA tipo Bourdon, escala de -1 a 9 kgf/cm²).

O venturi estudado (figura 3.3) foi instalado antes da entrada do reator "air-lift", com a finalidade de auto aspiração do ar atmosférico, evitando a utilização de compressores.

O descarte da água para a lavagem do sistema foi realizado por meio da válvula V_2 .

A pressão atmosférica local foi medida por um barômetro tipo aneróide (FISCHER modelo 104 – Alemanha, escala de 680 a 800 mmHg)

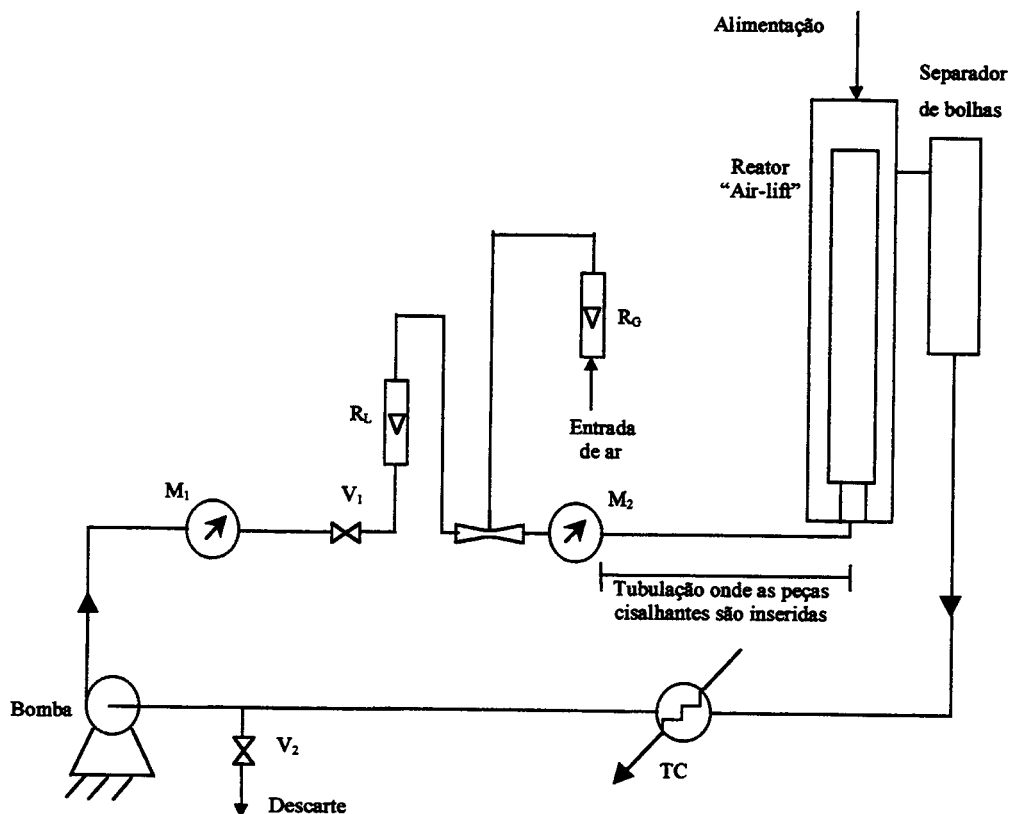


FIGURA 3.1 – Fluxograma simplificado do sistema experimental montado.

3.1.1 – Trocador de Calor

O trocador de calor utilizado nos experimentos foi construído na oficina mecânica do DEA/FEA/UNICAMP. A figura 3.2 mostra o diagrama esquemático deste trocador, operando em contra corrente. Foram utilizados tubos de $\frac{1}{2}$ polegada por onde o fluido primário circulava, encamisados com tubos de 1 polegada, por onde circulava o fluido de refrigeração. O controle da temperatura do fluido primário foi realizado pela manipulação de vazão do fluido de refrigeração por meio de uma válvula globo.

A temperatura do líquido foi medida por meio de um termômetro de bulbo de mercúrio (INCOTERM modelo 227577, escala de -10 a 110°C), instalado dentro do reator principal. Para manter a temperatura constante foi construído um trocador de calor (TC) de

tubos concêntricos encamisado, cujo fluido de resfriamento foi água da torneira, para controle na faixa 30 a 35°C, e água refrigerada e recirculada através de banho térmico (com capacidade de 2000 m³, com compressor BITZ bloco IV), para controle da temperatura em torno de 20°C. Para melhorar a transferência de massa entre as fases líquida e gasosa, peças cisalhantes (item 3.1.3) foram colocadas dentro de um tubo localizado entre o venturi e o reator principal, conforme indica a figura 3.1.

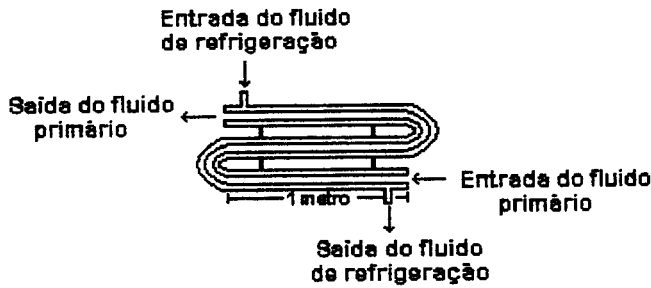


FIGURA 3.2 – Trocador de calor

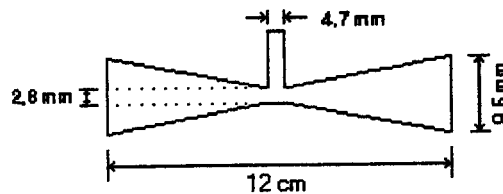


FIGURA 3.3 – Desenho esquemático do venturi com suas dimensões geométricas.

3.1.2 – Reator “Air-lift” e Separador de Bolhas

O reator “air-lift” foi construído de tubo cilíndrico, de PVC, de diâmetro de 10 cm e 72 cm de altura, conforme ilustra a figura 3.1. Para evitar que as bolhas de ar recirculassem no sistema, foi construído um separador de bolhas cilíndrico, com altura de 36 cm e diâmetro 7 cm, cuja capacidade nominal era de 1,5 litros, acoplado ao reator principal.

3.1.3 – Peças Cisalhantes

As peças cisalhantes foram usinadas na oficina mecânica do DEA/FEA/UNICAMP, utilizando como matéria prima um tarugo de nylon com diâmetro de 15mm. Visando estudar a influência da geometria destas peças sobre o coeficiente volumétrico de transferência de massa, duas diferentes peças cisalhantes foram produzidas conforme desenho mecânico apresentado na figura 3.4. Pequenos parafusos conectavam as peças cisalhantes a um arame e estas foram colocadas após o manômetro M_2 , localizado na saída do venturi, dentro de um tubo de $\frac{1}{2}$ polegada e 0,79 m de comprimento, diretamente conectado à entrada do reator *air-lift* (conforme figura 3.1).

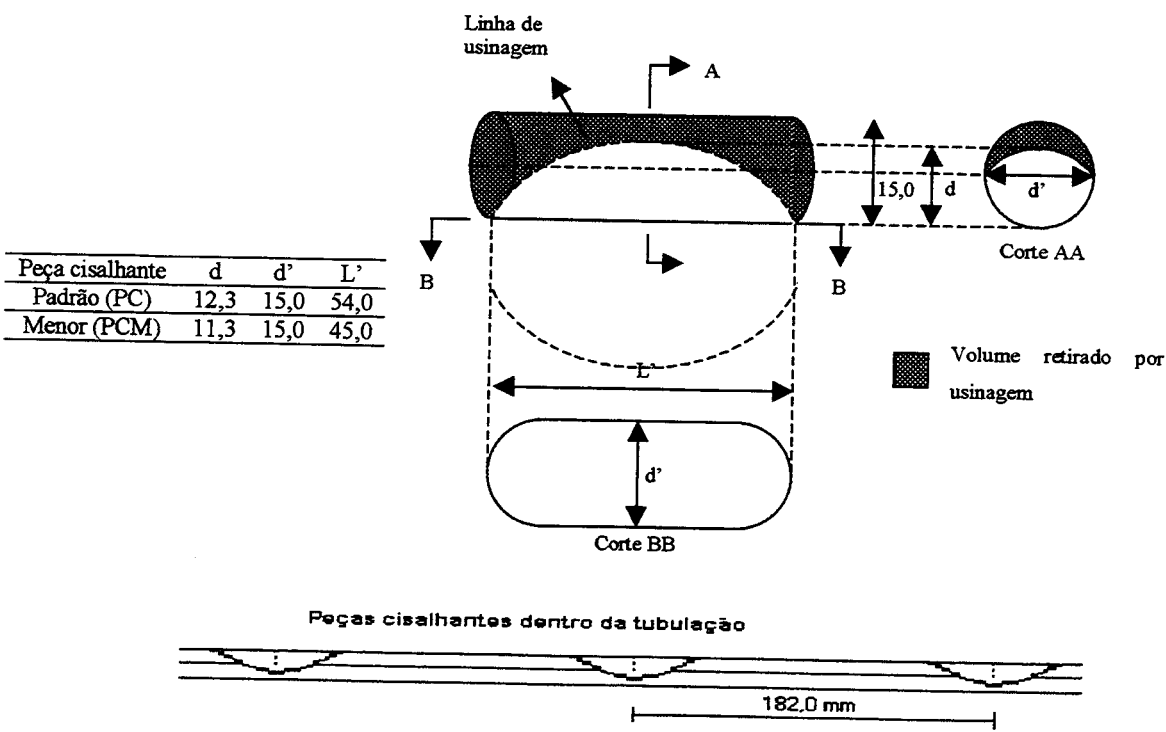


FIGURA 3.4 – Desenho mecânico das peças cisalhantes

3.2 – Condições Experimentais

Os experimentos foram realizados em três diferentes temperaturas (20, 30 e 35°C), três condições de vazão do fluido primário (200, 300 e 400 l/h) e 3 vazões de ar (101,8, 204,0 e 298,5 ml/min). Visando verificar a influência da geometria e o número de peças cisalhantes sobre o coeficiente volumétrico de transferência de massa, os experimentos foram feitos sem uso de peça cisalhante (SPC), utilizando 1 peça cisalhante padrão (1 PC), 2 peças cisalhantes padrão (2 PC), 3 peças cisalhantes padrão (3PC) e três peças cisalhantes menores (3 PCM).

3.3 – Perda de carga

A perda de carga foi calculada a partir da diferença de pressão medida na saída do venturi e a pressão calculada na entrada do reator conforme a seguinte equação:

$$P_M = \rho g H \quad (12)$$

3.4 – Análise Dimensional

A análise dimensional foi realizada utilizando apenas as variáveis envolvidas entre o venturi e a tubulação localizada até a entrada do reator “air-lift”, com a finalidade de correlacionar os números adimensionais com as vazões de líquido e de ar e com a eficiência de transferência de massa do sistema. As variáveis utilizadas foram correlacionadas através da equação abaixo:

$$K_{La} = f(Q_L, Q_A, \Delta P, \rho_L, \mu_L, \sigma_L, d, d', D, L, l)$$

Onde:

Q_L, Q_A e ΔP - são variáveis dinâmicas;

ρ_L, μ_L e σ_L - são variáveis de transporte líquido

d, d', D, L e l - são variáveis geométricas

Após a definição de um núcleo de trabalho adequado, pelo teorema π - Buckingham é possível gerar nove π - grupos descritos abaixo:

$$\begin{aligned}\pi_1 &= \frac{\rho_L \cdot Q}{L \cdot \mu_L}; & \pi_2 &= \frac{Q_L}{Q_A}; & \pi_3 &= \frac{Q}{L^3 \cdot K_L a}; & \pi_4 &= \frac{\rho \cdot Q_L^2}{L^4 \cdot \Delta P}; & \pi_5 &= \frac{L}{D}; \\ \pi_6 &= \frac{L}{l}; & \pi_7 &= \frac{L}{d}; & \pi_8 &= \frac{L}{d'}; & \pi_9 &= \frac{\rho_L \cdot Q_L^2}{L^3 \cdot \sigma_L}\end{aligned}$$

3.5 Transferência de Massa

A transferência de massa entre as fases líquida e gasosa, foi analisada através de medidas físicas do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($k_L a$).

3.5.1 – Determinação do $k_L a$

Para o cálculo do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($k_L a$) do sistema, foi utilizado um eletrodo polarográfico (ATI ORIUM, modelo 810-USA). Foi colocado no sistema água da torneira, cujo volume era de aproximadamente 6,3 litros. Este método consiste em reduzir a concentração de oxigênio do sistema a aproximadamente zero, ponto a partir do qual a aeração deve ser iniciada, medindo-se então a variação de concentração em função do tempo. Para a etapa de desoxigenação do sistema, a entrada de ar foi fechada por meio de uma pinça e, em seguida, foi adicionado sulfito de sódio em excesso, juntamente com uma solução de sulfato de cobre (utilizada como catalisador), cuja reação química está apresentada no ANEXO A. O eletrodo foi instalado no separador de bolhas, sempre na mesma posição, ou seja, com o sensor localizado 4cm acima da saída do mesmo. A calibração do eletrodo foi realizado sempre no início dos trabalhos e a concentração de saturação foi corrigida para a pressão atmosférica (barômetro - FISCHER, tipo arenóide, modelo 104 – Alemanha, escala de 680 a 800 mmHg).

Assim quando o eletrodo marcava valores bem próximos de zero, a entrada de ar era liberada e o cronômetro disparado. Os valores das concentrações de oxigênio foram tomados em intervalos de 30 segundos, e a medida que as concentrações permaneciam constantes este intervalo aumentava

As TABELAS 3.5.1 e 3.5.2 e a equação 3.3.1 permitiram a correção da concentração de saturação.

$$C_S = (C_S)_{760} \times \frac{P_m - P_v}{760 - P_v} \quad (13)$$

TABELA 3.5.1 – Valores da concentração de oxigênio saturado $(C_S)_{760}$ a 1 atm (RAMALHO, 1983).

Temperatura (°C)	$(C_S)_{760}$ O ₂ (mg/l)
0	14,6
5	12,8
10	11,3
15	10,2
20	9,2
25	8,4
30	7,6
35	7,1
40	6,6

TABELA 3.5.2 – Valores de pressão de vapor da água (RAMALHO, 1983).

Temperatura (°C)	P _v (mmHg)
0	4,579
5	6,543
10	9,209
15	12,788
20	17,535
25	23,756
30	31,824
35	42,175
40	55,324

O k_1a foi obtido através da inclinação da reta de $\ln(C_s - C)$ versus tempo:

$$\frac{dC}{dt} = k_1a(C_s - C) \quad (14)$$

Integrando a equação acima:

$$\ln(C_s - C) = k_1a \times t + Const. \quad (15)$$

Os valores das concentrações em função do tempo para cada experimento estão apresentados no APENDICE A.

3.6 – Eficiência de transferência da unidade de aeração

De acordo com RAMALHO (1983) a eficiência de transferência da unidade de aeração (TE) é expressa em termos de massa de oxigênio transferido por energia gasta:

$$TE = \frac{kgO_2}{kWh} \quad (16)$$

onde a taxa mássica de oxigênio transferido em (kg O₂)/h é dado por

$$Taxa = k_1a \times C_s \times V \times \rho_L \quad (17)$$

onde C_s é dado em mg/l= ppm=10⁻⁶ kg O₂/kg H₂O

A potência foi calculada a partir da seguinte equação:

$$Pot = \frac{\rho_L \times g \times Q_L \times H}{\eta} \quad (18)$$

onde a eficiência global (η) de 61,25% foi adotada para o cálculo da equação acima conforme recomendações de MORAES Jr. (1988).

3.7 – Tensão Superficial

De acordo com GONÇALVES, D. 1968, o método para medir a tensão superficial do líquido foi baseado na lei de TATES que enuncia:

“o peso de uma gota é proporcional ao raio do tubo e à tensão superficial do líquido.

Assim usando um mesmo tubo, contamos um grande número de gotas da solução utilizada nos experimentos e determinamos o peso das mesmas.

$$p = 2\pi R \sigma_L \quad (19)$$

onde:

σ - é a tensão superficial do líquido

R – raio da saída do tubo

Repetindo a operação para um líquido de tensão superficial conhecida teremos:

$$p' = 2\pi R \sigma' \quad (20)$$

Dividindo esta equação pela anterior encontramos:

$$\frac{p'}{p} = \frac{\sigma'}{\sigma} \quad (21) \quad \text{ou} \quad \frac{m' g}{mg} = \frac{\sigma'}{\sigma} \quad (22)$$

Portanto para o cálculo da tensão superficial foi utilizada a equação:

$$\sigma = \sigma' \frac{m}{m'} \quad (23) \quad (\text{onde } \sigma' \text{ é a tensão superficial do líquido conhecido})$$

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com a literatura, os equipamentos tipo *Bernoulli* (venturi, placas de orifício, ejetores e etc. são utilizados com o objetivo de melhorar a aeração em sistemas de tratamento de águas residuárias, ou reatores biológicos, consumindo menor quantidade de energia. O esquema mostrado na figura 3.1 representa o equipamento construído para o desenvolvimento deste trabalho, o qual possibilitou verificar a influência de peças cisalhantes sobre o coeficiente volumétrico de transferência de massa.

O trocador de calor apresentado na figura 3.2 mostrou-se satisfatório durante os experimentos em que a temperatura foi controlada nos níveis de 30 e 35°C, utilizando água da torneira, cuja vazão foi controlada por uma válvula. A utilização de um banho refrigerado, acoplado ao trocador, proporcionou a realização dos experimentos com corrente de saída mantida a 20°C.

O separador de bolhas acoplado ao reator *air-lift* evitou o reciclo das bolhas. Foi verificado por cima do separador que as maioria das bolhas ao saírem do reator principal subiam a invés de retornarem ao sistema. No final de alguns experimentos a leitura da concentração de oxigênio no eletrodo oscilava, o que pode ser atribuído ao reciclo de algumas bolhas, que as vezes aderiam no sensor. Em alguns experimentos foram obtidos resultados duvidosos, cuja confirmação se deu através da realização de réplicas (duplicata ou triplicata).

4.1 – Coeficiente Volumétrico de Transferência de Massa

De acordo com o método descrito no item 3.5.1, o coeficiente volumétrico de transferência de massa foi calculado utilizando os valores da concentração de oxigênio (APÊNDICE A) em até 60% da concentração de saturação, ou o primeiro valor depois deste, uma vez que as medidas de concentração de oxigênio dissolvido próximas da concentração de saturação apresentaram oscilações.

Os resultados apresentados nas tabelas 4.1 a 4.3, mostram respectivamente para as temperaturas de 20, 30 e 35°C, que o coeficiente volumétrico de transferência de massa

aumentou com o aumento das vazões de líquido e de gás e também com a adição de peças cisalhantes.

TABELA 4.1 – Valores do coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{ia} (h^{-1})), sem peça cisalhante (SPC), utilizando 1 peça cisalhante (1 PC), 2 peças cisalhantes (2 PC), 3 peças cisalhantes (3 PC) e 3 peças cisalhantes menores (3 PCM) em diferentes vazões de líquido (Q_L) e de ar (Q_A) na temperatura de 20°C.

Q_L (l/h)	Q_A (ml/min)	k_{ia} (h^{-1})				
		SPC	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
200	198,0	1,73	3,30	3,67	4,03	3,30
300	198,0	2,42	3,50	5,17	6,04	4,07
400	198,0	2,85	4,77	5,60	7,33	5,19
200	383,0	3,06	5,09	8,86	9,68	7,19
300	383,0	4,18	7,46	11,45	11,95	9,62
400	383,0	5,96	9,17	14,05	14,72	10,56
200	522,0	5,12	7,65	10,15	11,09	7,94
300	522,0	5,41	9,50	12,45	13,38	10,54
400	522,0	6,19	12,28	14,85	15,74	12,65

TABELA 4.2 – Valores do coeficiente de transferência de massa volumétrico (k_{ja} (h^{-1})), sem peça cisalhante (SPC), utilizando 1 peça cisalhante (1 PC), 2 peças cisalhantes (2 PC), 3 peças cisalhantes (3 PC) e 3 peças cisalhantes menores (3 PCM) em diferentes vazões de líquido (Q_L) e de ar (Q_A) na temperatura de 30°C.

Q_L (l/h)	Q_A (ml/min)	k_{ja} (h^{-1})				
		SPC	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
200	198,0	2,19	3,53	4,46	5,02	3,70
300	198,0	3,21	4,06	6,60	7,48	5,55
400	198,0	3,32	5,02	7,67	8,91	6,03
200	383,0	3,75	6,82	9,66	11,86	7,87
300	383,0	5,39	9,02	12,13	13,96	10,70
400	383,0	6,59	9,77	15,71	17,77	11,34
200	522,0	5,80	8,57	10,69	13,16	9,06
300	522,0	6,76	11,13	14,04	15,43	11,27
400	522,0	7,24	14,92	18,45	19,99	15,21

TABELA 4.3 – Valores do coeficiente de transferência de massa volumétrico (k_{la} (h^{-1})), sem peça cisalhante (SPC), utilizando 1 peça cisalhante (1 PC), 2 peças cisalhantes (2 PC), 3 peças cisalhantes (3 PC) e 3 peças cisalhantes menores (3 PCM) em diferentes vazões de líquido (Q_L) e de vazões de ar (Q_A) na temperatura de 35°C .

Q_L (l/h)	Q_A (ml/min)	k_{la} (h^{-1})				
		SPC	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
200	198,0	2,40	3,74	4,55	5,32	3,89
300	198,0	3,40	4,33	6,80	8,19	6,18
400	198,0	3,94	5,78	8,70	9,45	6,75
200	383,0	4,42	7,31	10,15	12,20	8,60
300	383,0	5,78	9,96	12,91	15,48	11,64
400	383,0	7,51	10,13	16,83	18,40	12,72
200	522,0	6,18	8,87	11,41	14,54	9,37
300	522,0	7,01	12,12	14,78	16,97	12,40
400	522,0	7,94	16,74	19,54	20,99	17,28

4.2 – Eficiência de Transferência de Oxigênio no Sistema

De acordo com as tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 a melhor eficiência de transferência de oxigênio foi $1,17 \text{ kgO}_2/\text{kWh}$ a 35°C , vazão de líquido de 200 l/h e vazão de ar de 522 ml/min . JACKSON & COLLINS (1964), obtiveram uma taxa máxima de transferência de oxigênio de $3,45 \text{ kgO}_2/\text{kWh}$, resultado superior ao obtido por este trabalho, possivelmente devido à diferença na geometria dos equipamentos e também pelo fato dos experimentos terem sido realizados em vazões de ar baixas, para evitar erros nas medidas de

concentração de oxigênio. Foi verificado através dos resultados um aumento significativo tanto no coeficiente de transferência de massa quanto na eficiência de transferência da unidade de aeração, consequência da adição de peças cisalhantes.

TABELA 4.4 – Valores da eficiência de transferência da unidade de aeração (TE (kg O₂/kWh)), calculada na temperatura de 20°C, para os experimentos: sem a utilização de peças cisalhantes (SPC), utilizando 1, 2 ou 3 peças cisalhantes (PC) de mesmas dimensões e 3 peças cisalhantes menores (3 PCM)

Q _L (l/h)	Q _A (ml/min)	TE (kg O ₂ /kWh)				
		SP	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
200	198,0	0,18	0,35	0,38	0,42	0,34
300	198,0	0,17	0,24	0,36	0,42	0,28
400	198,0	0,15	0,25	0,29	0,38	0,27
200	383,0	0,32	0,53	0,92	1,01	0,75
300	383,0	0,29	0,52	0,80	0,84	0,67
400	383,0	0,31	0,48	0,74	0,77	0,55
200	522,0	0,54	0,80	1,07	1,16	0,83
300	522,0	0,38	0,67	0,87	0,93	0,74
400	522,0	0,32	0,65	0,78	0,82	0,66

TABELA 4.5 – Valores da eficiência de transferência da unidade de aeração (TE (kg O₂/kWh)), calculada na temperatura de 30°C, para os experimentos: sem a utilização de peças cisalhantes (SPC), utilizando 1, 2 ou 3 peças cisalhantes (PC) de mesmas dimensões e 3 peças cisalhantes menores (3 PCM)

Q _L (l/h)	Q _A (ml/min)	TE (kg O ₂ /kWh)				
		SP	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
200	198,0	0,19	0,31	0,39	0,43	0,32
300	198,0	0,18	0,23	0,38	0,43	0,32
400	198,0	0,14	0,22	0,33	0,38	0,26
200	383,0	0,32	0,59	0,84	1,03	0,68
300	383,0	0,31	0,52	0,70	0,81	0,62
400	383,0	0,29	0,42	0,68	0,77	0,49
200	522,0	0,50	0,74	0,92	1,14	0,78
300	522,0	0,39	0,64	0,81	0,89	0,65
400	522,0	0,31	0,65	0,80	0,86	0,66

TABELA 4.6 – Valores da eficiência de transferência da unidade de aeração (TE (kg O₂/kWh)), calculada na temperatura de 35°C, para experimentos: sem a utilização de peças cisalhantes (SPC), utilizando 1, 2 ou 3 peças cisalhantes (PC) de mesmas dimensões e 3 peças cisalhantes menores (3 PCM)

Q _L (l/h)	Q _A (ml/min)	TE (kg O ₂ /kWh)				
		SP	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
200	198,0	0,19	0,30	0,37	0,43	0,31
300	198,0	0,18	0,23	0,37	0,44	0,33
400	198,0	0,16	0,23	0,35	0,38	0,27
200	383,0	0,36	0,59	0,82	0,99	0,70
300	383,0	0,31	0,54	0,70	0,84	0,63
400	383,0	0,30	0,41	0,68	0,75	0,52
200	522,0	0,50	0,72	0,92	1,17	0,76
300	522,0	0,38	0,65	0,80	0,91	0,67
400	522,0	0,32	0,68	0,79	0,85	0,7

De acordo com as tabelas 4.4, 4.5 e 4.6, a eficiência de transferência aumentou com a diminuição da vazão de líquido e com o aumento da vazão de ar. Comparando com alguns resultados da literatura apresentados na tabela 1.1, na prática industrial a eficiência de transferência varia de 0,49 a 1,48kgO₂/kWh, utilizando diferentes sistemas de aeração. No presente trabalho os valores da eficiência variaram de 0,14 a 1,17kgO₂/kWh, porém estes resultados foram obtidos com vazões de ar atmosférico limitadas para evitar erros de leitura da concentração de oxigênio dissolvido. Foram realizados dois experimentos sem a utilização de peças cisalhantes (resultados no APÊNDICE B) e utilizando três peças

cisalhantes, de maior dimensão (resultados no APÊNDICE B) com 30°C, a vazão de líquido de 200 l/h e vazão de ar de 1600 ml/min. Enquanto sem a utilização de peças a eficiência foi de 0,66 kgO₂/kWh, com o emprego de três peças cisalhantes a eficiência foi de 1,53 kgO₂/kWh, ocorrendo um aumento de 32 e 34%, respectivamente, quando comparado aos experimentos realizados a 30°C na vazão de líquido de 200 l/h e vazão de ar de 522 ml/min, sem e com a utilização de peças cisalhantes.

4.3 – Influência das Peças Cisalhantes

Os experimentos foram realizados com e sem a utilização de peças cisalhantes. As peças foram usinadas em dois tamanhos diferentes, conforme figura 3.4, sendo que a maior delas foi utilizada para verificar a influência do número de peças cisalhantes (1PC, 2PC e 3PC, respectivamente, com uma, duas e três peças cisalhantes dispostas em série) sobre a hidrodinâmica e a transferência de massa nos experimentos, comparando com a situação em que três peças cisalhantes menores (3 PCM) eram utilizadas.

A utilização destas peças após o venturi aumentou a perda de carga do sistema (tabela 7), verificada por um manômetro instalado na saída do venturi e antes das peças (conforme figura 3.1) o que proporcionou um aumento considerável no coeficiente volumétrico de transferência de massa (tabelas 4.1, 4.2 e 4.3), uma vez que ocorreu redução do diâmetro das bolhas e conseqüente aumento da área específica de transferência de massa.

As figuras 4.1 a 4.9 mostram a variação do k_{La} em função da vazão de líquido em três diferentes níveis de vazão de ar e temperatura verificou-se que com a adição de peças cisalhantes ao sistema houve aumento do coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{La}), devido a um aumento da área interfacial entre a fase líquida e a fase gasosa, provocado pelo cisalhamento das bolhas de ar em conseqüência da diminuição da área de passagem do líquido. Observou-se ainda, que o k_{La} aumentou consideravelmente elevando-se o número de peças dispostas em série, fato ocorrido tanto para as peças maiores quanto para as menores.

Comparando os experimentos em que foram utilizadas 3 peças cisalhantes idênticas, com os de três peças cisalhantes menores, também idênticas entre si, verificou-se que os valores do k_{La} diminuíram com a redução do tamanho das peças, devido a uma maior área de passagem do líquido, proporcionando menor cisalhamento e conseqüentemente menor área interfacial entre a fase líquida e fase gasosa. O k_{La} obtido nos experimentos com a utilização de duas peças cisalhantes, de dimensões maiores, foi maior do que aqueles em que foram utilizadas três peças cisalhantes menores.

Conforme apresenta a figura 3.4, as peças cisalhantes foram instaladas no tubo de forma que a passagem do líquido ficasse restrita à parte inferior do tubo, evitando assim, a coalescência das bolhas e o fenômeno de estratificação no escoamento bifásico horizontal, no qual a fase gasosa se separa do sistema passando a escoar pela parte superior do tubo.

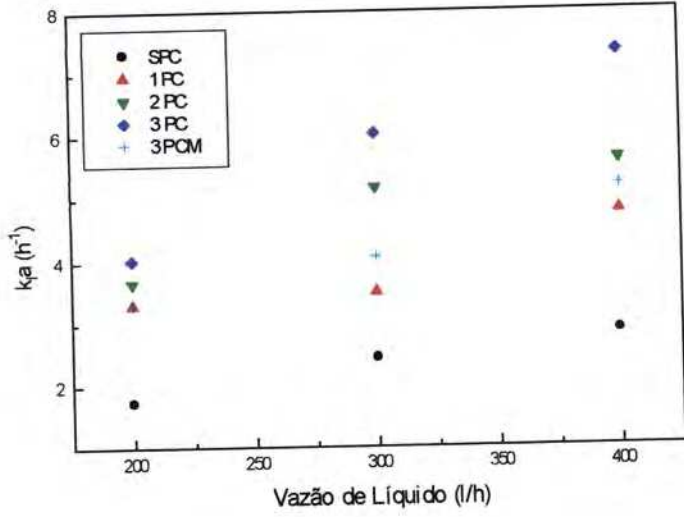


FIGURA 4.1 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 20^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 198,0\text{ml/min}$).

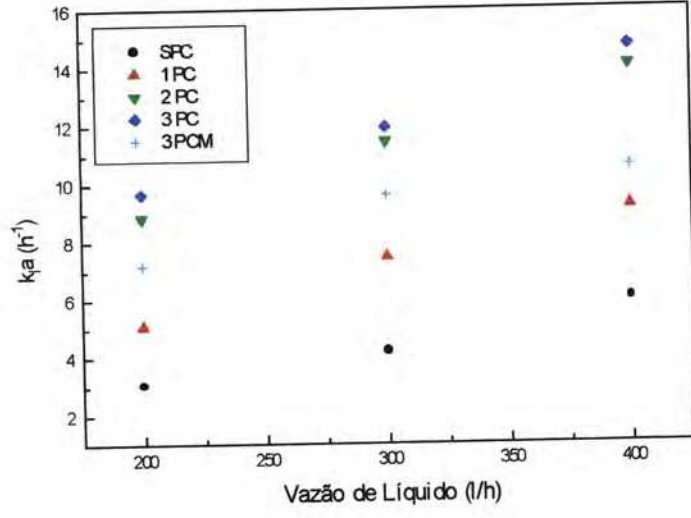


FIGURA 4.2 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 20^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 383,0\text{ml/min}$).

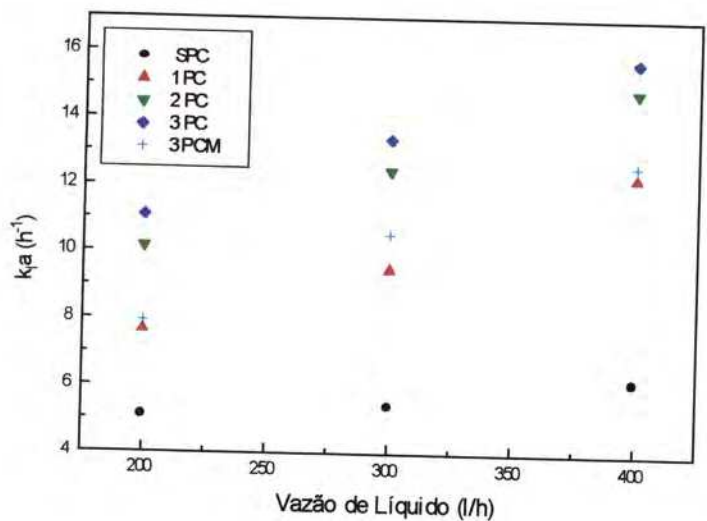


FIGURA 4.3 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 20^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 522,0\text{ml/min}$).

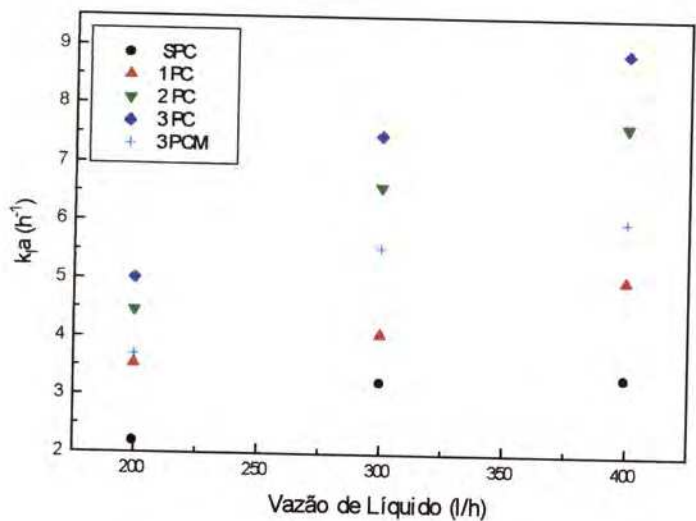


FIGURA 4.4 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 30^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 198,0\text{ml/min}$).

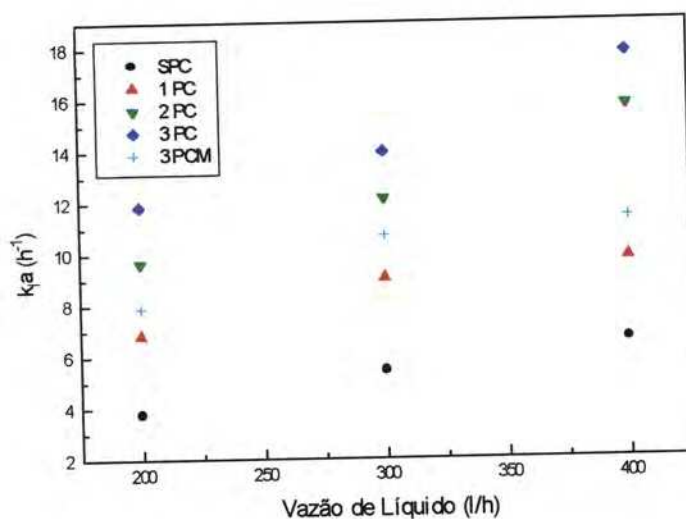


FIGURA 4.5 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 30^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 383,0\text{ml/min}$).

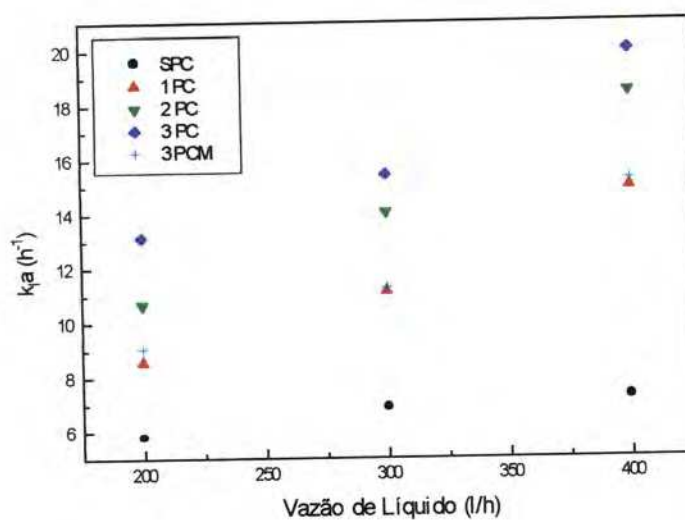


FIGURA 4.6 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 30^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 522,0\text{ml/min}$).

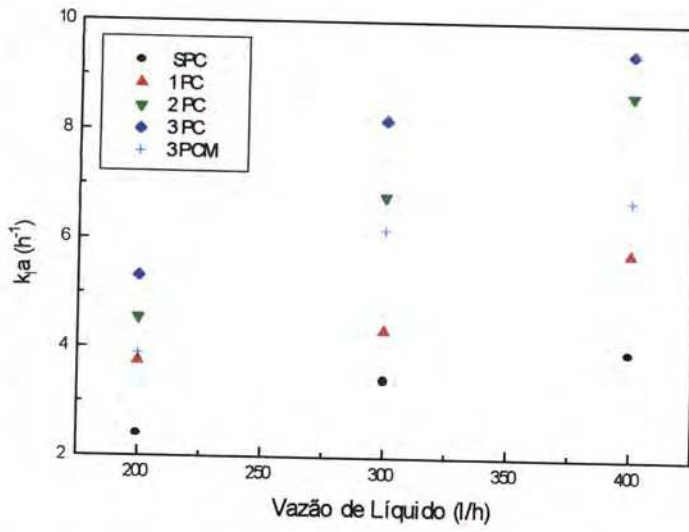


FIGURA 4.7 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 35^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 198,0 \text{ ml/min}$).

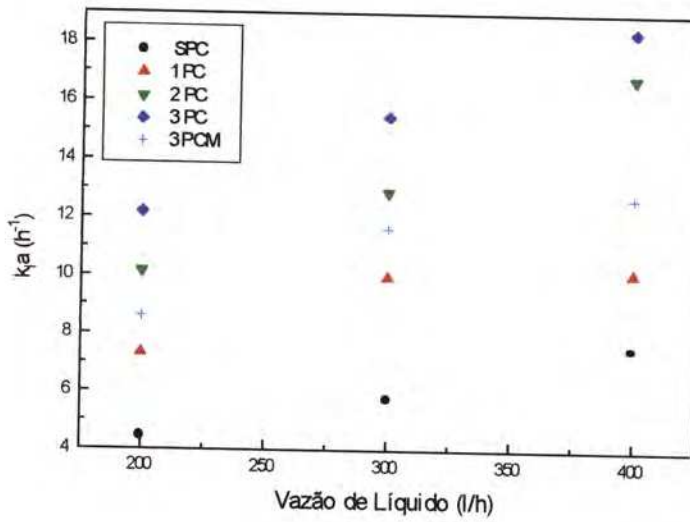


FIGURA 4.8 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 35^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 383,0 \text{ ml/min}$).

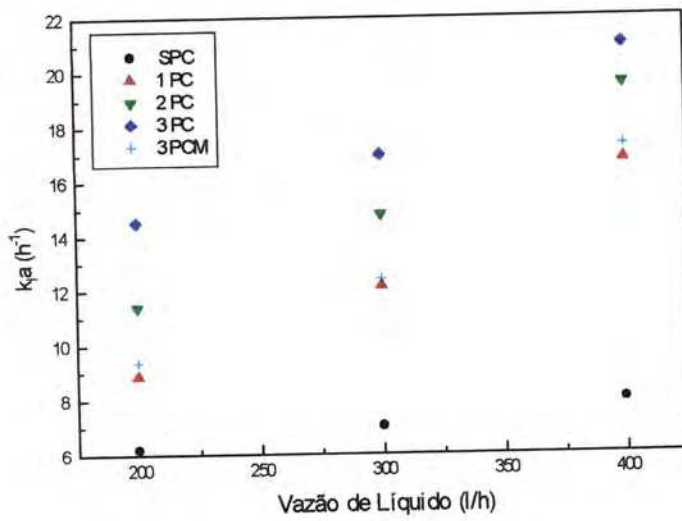
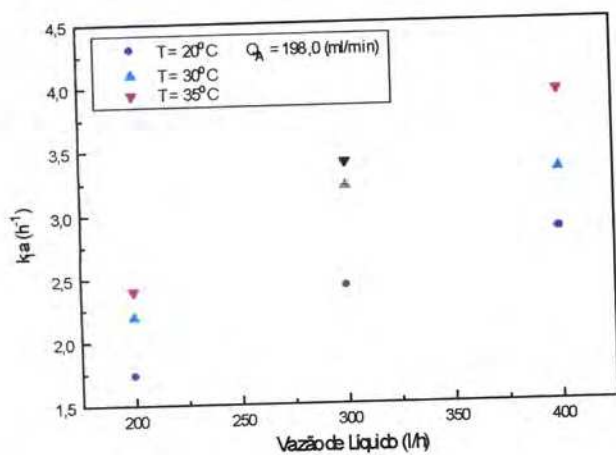


FIGURA 4.9 - Coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes ($T = 35^{\circ}\text{C}$ e $Q_A = 522,0 \text{ ml/min}$)

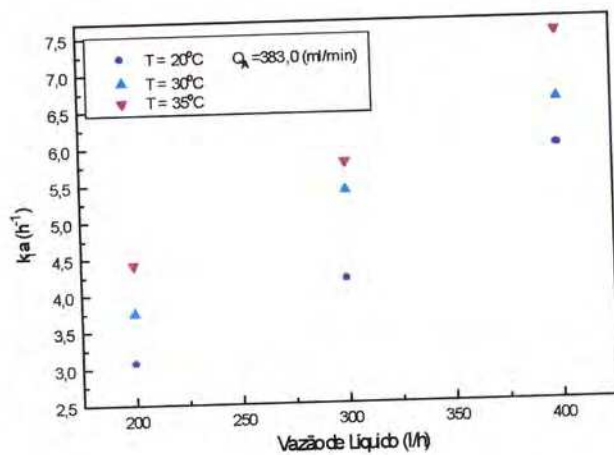
4.4 – Influência da Temperatura

As figuras 4.10 a 4.14 apresentam a influência da temperatura sobre os dados experimentais de k_{la} em função da vazão de líquido com e sem a utilização de peças cisalhantes em três diferentes níveis de vazão de ar. Os experimentos foram realizados nas seguintes temperaturas: 20, 30 e 35°C. A 20°C a desoxigenação (ANEXO A) da água ocorreu em um intervalo maior de tempo, quando comparado às temperaturas de 30 e 35°C.

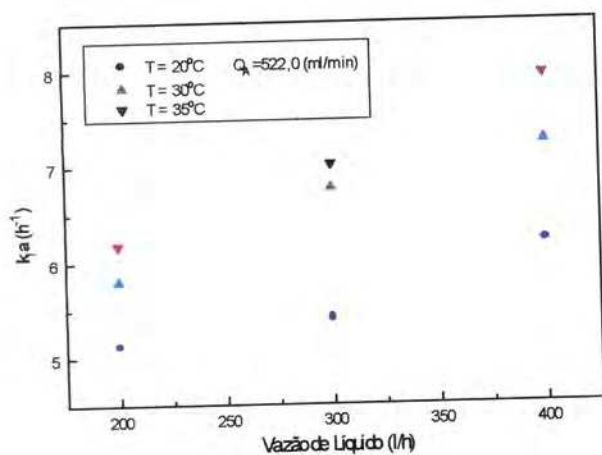
A partir destas figuras verifica-se que o coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{la}) aumenta com a elevação da temperatura, comportamento também observado por RAMALHO (1983).



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4.10 – Influência da temperatura sobre o coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{La}), em diferentes vazões de ar: (a) 198,0 ml/min, (b) 383,0 ml/min e (c) 522,0 ml/min, sem a utilização de peças cisalhantes.

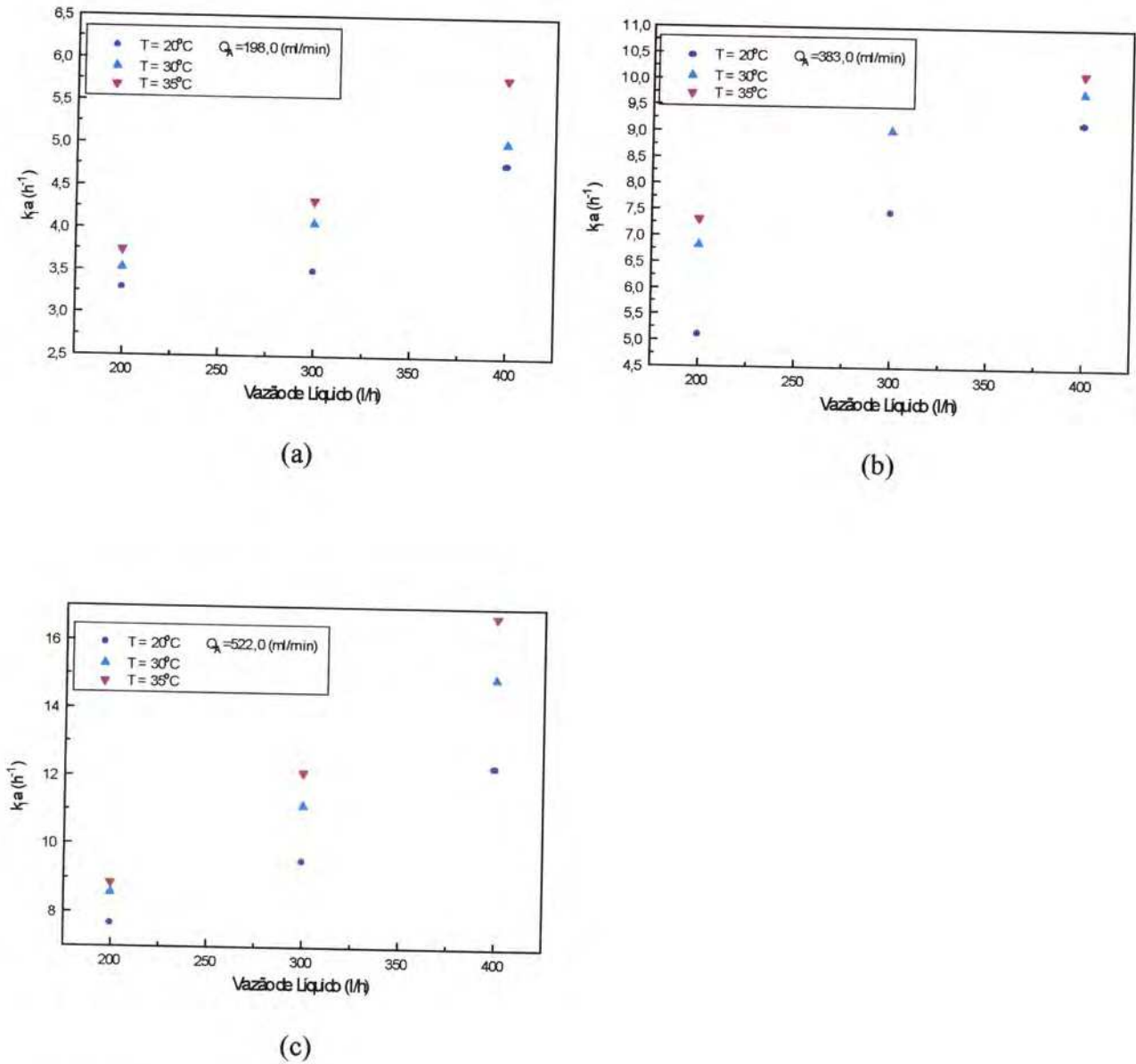
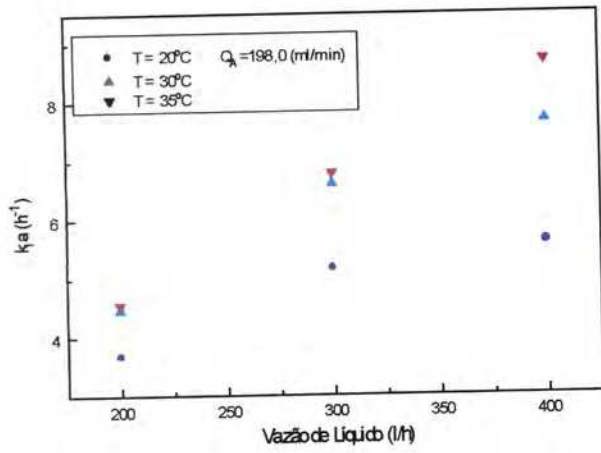
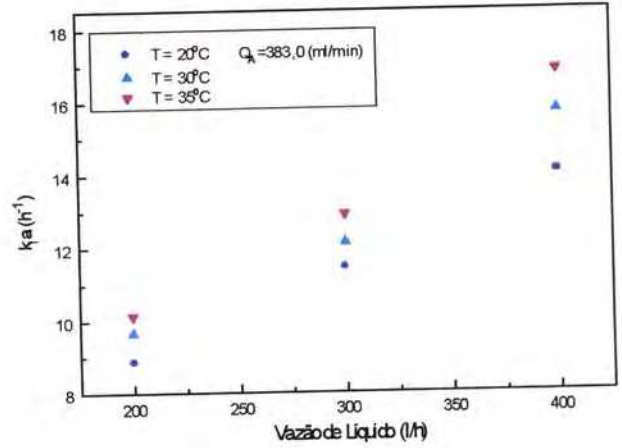


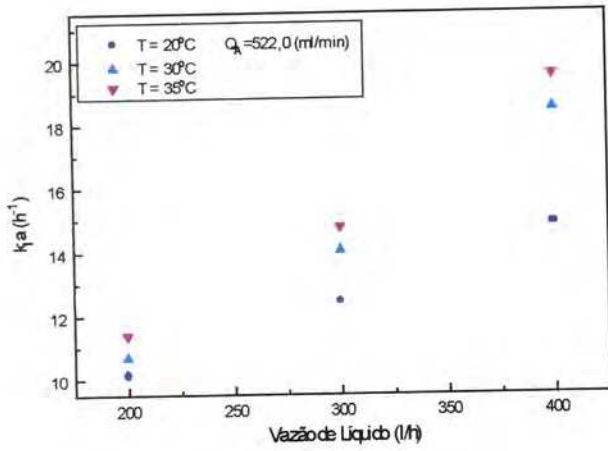
FIGURA 4.11 – Influência da temperatura sobre o coeficiente volumétrico de transferência de massa ($k_L a$), em diferentes vazões de ar: (a) 198,0 ml/min , (b) 383,0 ml/min e (c) 522,0 ml/min , utilizando uma peça cisalhante (1PC).



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4.12 – Influência da temperatura sobre o coeficiente volumétrico de transferência de massa ($k_L a$), em diferentes vazões de ar: (a) 198,0 ml/min, (b) 383,0 ml/min e (c) 522,0 ml/min, utilizando duas peças cisalhantes (2PC).

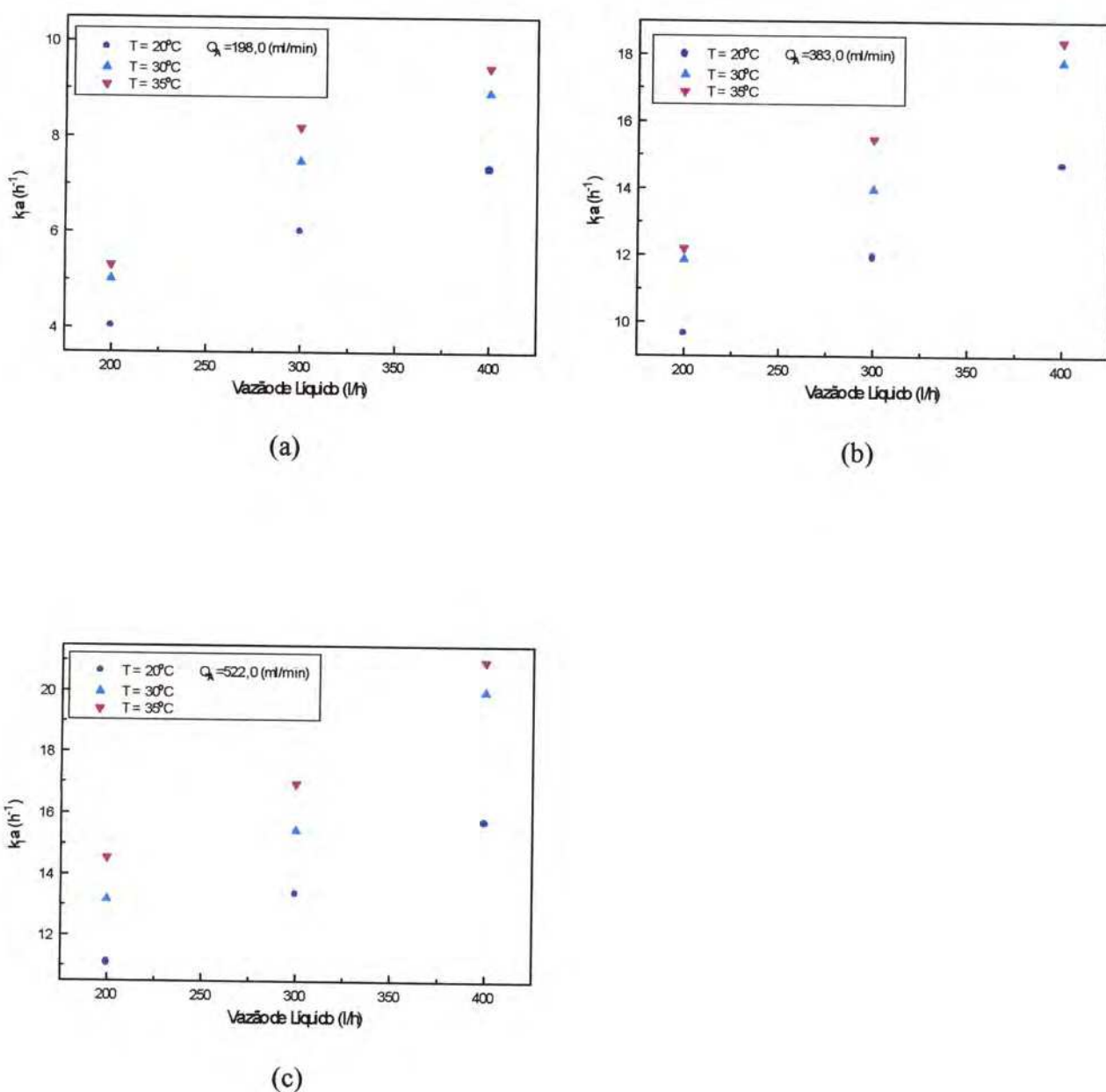


FIGURA 4.13– Influência da temperatura sobre o coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{La}), em diferentes vazões de ar: (a) 198,0 ml/min, (b) 383,0 ml/min e (c) 522,0 ml/min, utilizando três peças cisalhantes (3PC).

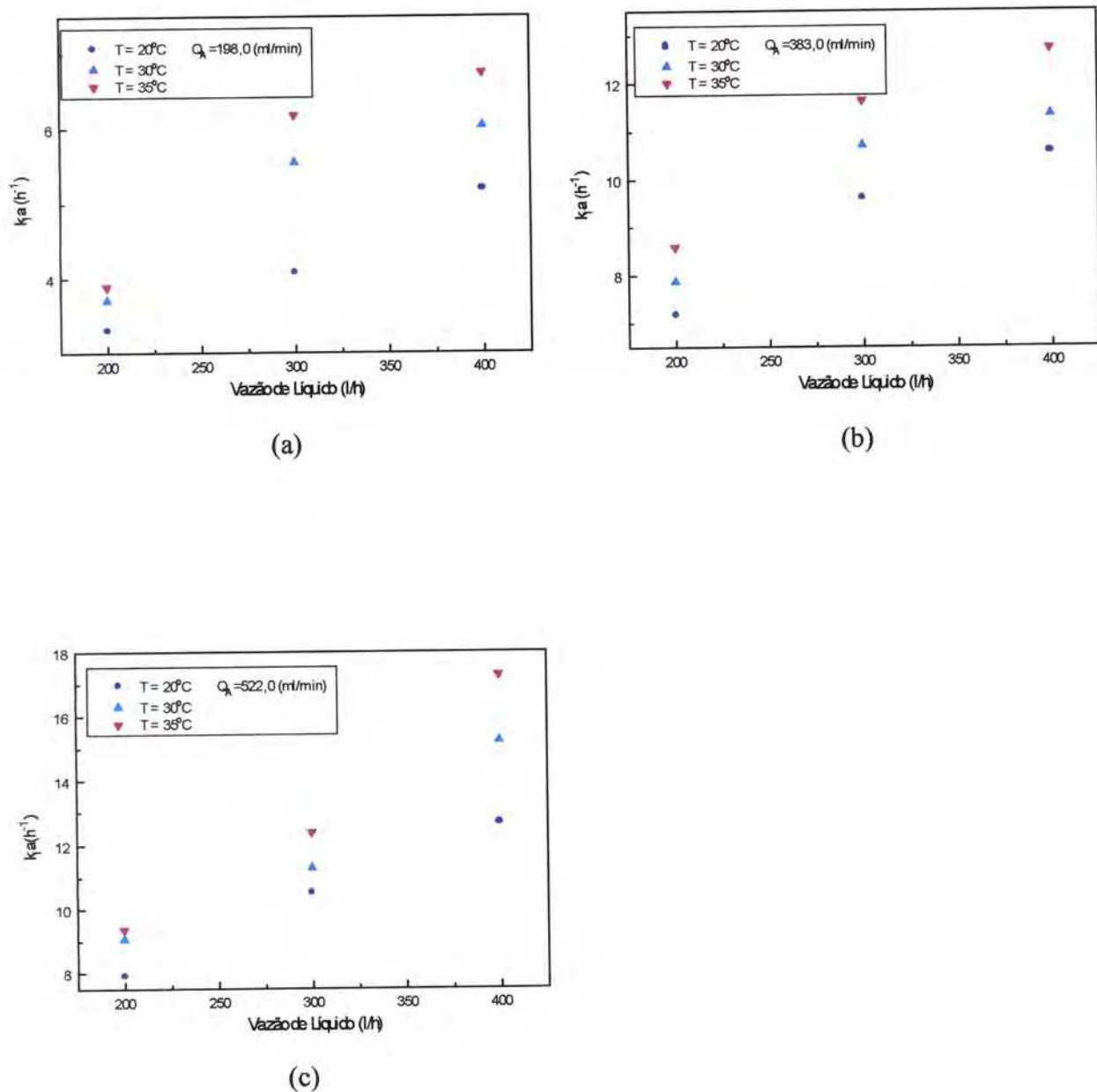


FIGURA 4.14 – Influência da temperatura sobre o coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{La}), em diferentes vazões de ar: (a) 198,0 ml/min, (b) 383,0ml/min e (c) 522,0 ml/min, utilizando três peças cisalhantes menores (3PCM).

4.5 – Perda de Carga

Conforme descrito no item 3.3, a perda de carga foi calculada entre o venturi e a entrada do reator. As peças cisalhantes utilizadas com a finalidade de aumentar a transferência de massa do equipamento, causou também uma redução da área livre de passagem do líquido, aumentando a perda de carga mas proporcionando maior cisalhamento das bolhas. Esta configuração evitou, ainda, a estratificação do escoamento bifásico horizontal.

4.5.1 – Medidas de Pressões

As pressões manométricas foram medidas depois da bomba (M_1), e depois do venturi (M_2), sendo que a pressão na entrada do reator foi calculada conforme descrito no item 3.3, para verificar a perda causada pela adição das peças.

TABELA 4.7 – Valores das pressões depois da bomba (PDB) e depois do venturi (PDV), em diferentes vazões de líquido e de ar e sob a influência de peças cisalhantes nas seguintes condições: sem peça cisalhante (SPC), 1 peça cisalhante (1 PC), 2 peças cisalhantes (2 PC), 3 peças cisalhantes (3 PC), 3 peças cisalhantes menores (3 PCM).

Q_L (l/h)	Q_A (ml/min)	SPC		1 PC		2 PC		3 PC		3 PCM	
		PDB	PDV	PDB	PDV	PDB	PDV	PDB	PDV	PDB	PDV
200	198,0	2,99	0,09	2,95	0,1	2,90	0,15	2,90	0,20	2,90	0,12
300	198,0	2,90	0,1	2,85	0,13	2,85	0,22	2,85	0,30	2,85	0,17
400	198,0	2,85	0,11	2,80	0,22	2,80	0,32	2,80	0,49	2,80	0,25
200	383,0	2,99	0,09	2,95	0,1	2,90	0,15	2,90	0,20	2,90	0,12
300	383,0	2,90	0,1	2,85	0,13	2,85	0,22	2,85	0,30	2,85	0,17
400	383,0	2,85	0,11	2,80	0,22	2,80	0,32	2,80	0,49	2,80	0,25
200	522,0	2,99	0,09	2,95	0,1	2,90	0,15	2,90	0,20	2,90	0,12
300	522,0	2,90	0,1	2,85	0,13	2,85	0,22	2,85	0,30	2,85	0,17
400	522,0	2,85	0,11	2,80	0,22	2,80	0,32	2,80	0,49	2,80	0,25

De acordo com a TABELA 4.7 observa-se uma grande perda de carga causada pelo venturi, com ou sem a utilização de peças cisalhantes. Verificou-se também que a vazão de ar não causou variação significativa no valor da pressão manométrica.

O valor da pressão manométrica calculada na entrada do reator foi de $0,0599 \text{ kgf/cm}^2$.

TABELA 4.8 – Valores das pressões medidas na saída do venturi (PDV) e da diferença de pressão (DP) entre o venturi e a calculada na entrada do reator, (kgf/cm^2).

Q_L (l/h)	SPC		1 PC		2 PC		3 PC		3 PCM	
	PDV	DP	PDV	DP	PDV	DP	PDV	DP	PDV	DP
200	0,09	0,03	0,1	0,04	0,15	0,09	0,20	0,14	0,12	0,06
300	0,1	0,04	0,13	0,07	0,22	0,16	0,30	0,24	0,17	0,11
400	0,11	0,05	0,22	0,16	0,32	0,26	0,49	0,43	0,25	0,19

De acordo com as figuras 4.15 a 4.23 o aumento da perda de carga causada por peças maiores aumentou da eficiência de transferência da unidade de aeração. Porém com o aumento da vazão de líquido e consequentemente aumento da perda de carga a eficiência de transferência de massa diminuiu, com exceção de alguns casos.

A eficiência de transferência da unidade de aeração em função da perda de carga, onde foram utilizadas 3 peças cisalhantes de dimensões menores (3PCM), apresentaram valores superiores àquelas em que foi utilizado apenas 1PC de dimensões maiores, mas foram inferiores às curvas em que foram utilizadas duas ou três PC também de dimensões maiores.

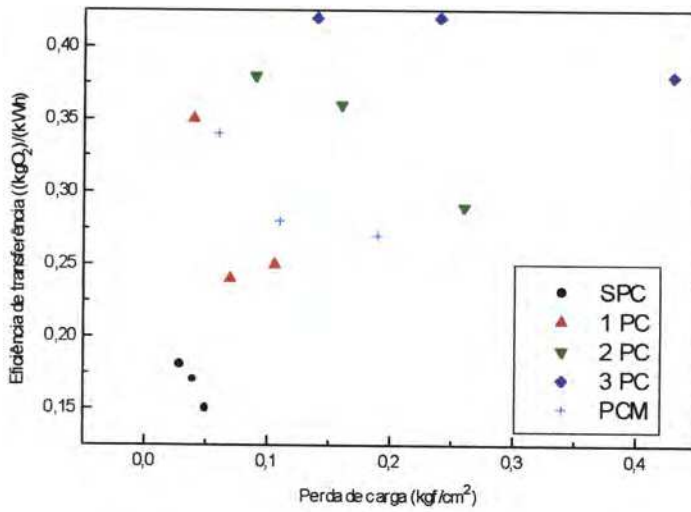


FIGURA 4.15 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga (em três níveis de vazão de líquido) a 20°C e vazão de ar de 198,0 ml/min.

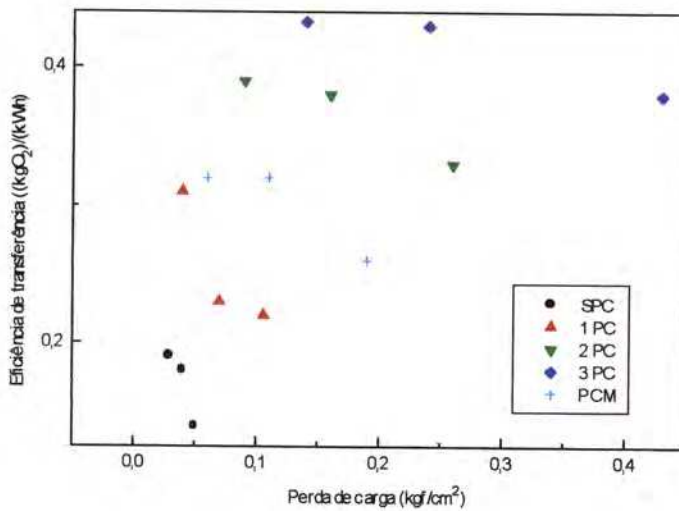


FIGURA 4.16 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga (em três níveis de vazão de líquido) a 30°C e vazão de ar de 198,0 ml/min.

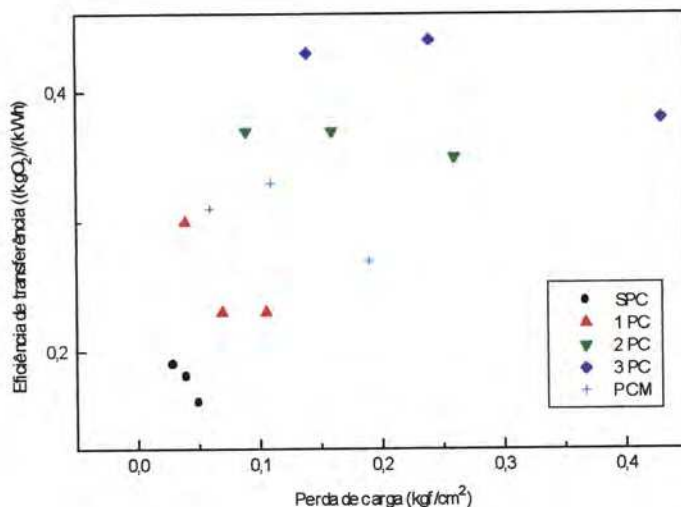


FIGURA 4.17 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga (em três níveis de vazão de líquido) a 35°C e vazão de ar de 198,0 ml/min.

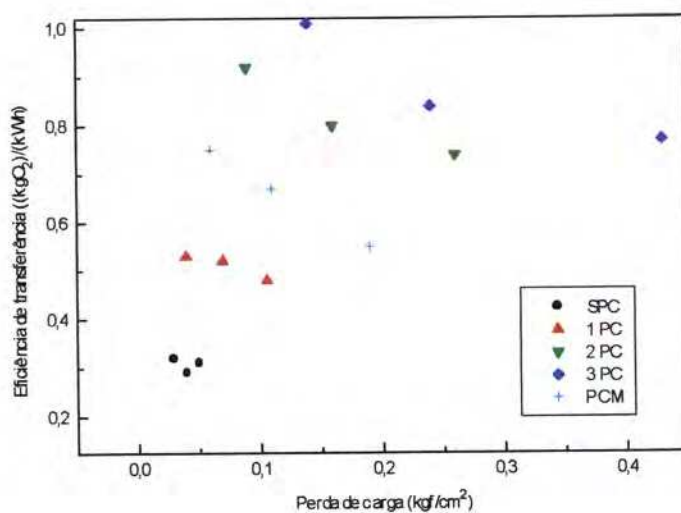


FIGURA 4.18 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga (em três níveis de vazão de líquido) a 20°C e vazão de ar de 383,0 ml/min.

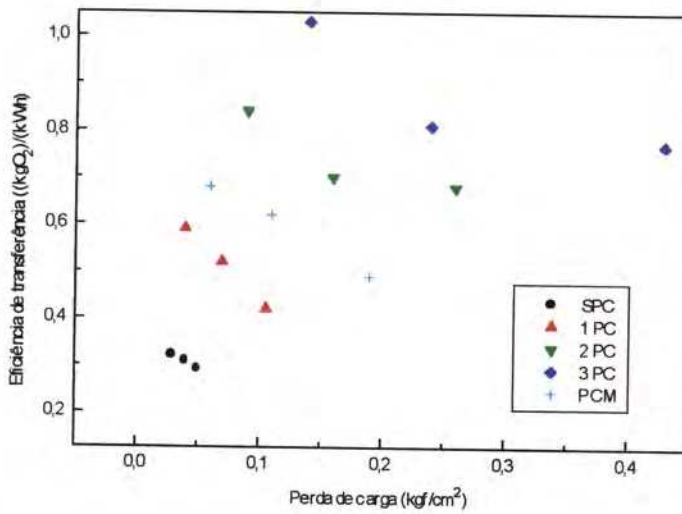


FIGURA 4.19 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga (em três níveis de vazão de líquido) a 30°C e vazão de ar de 383,0 ml/min.

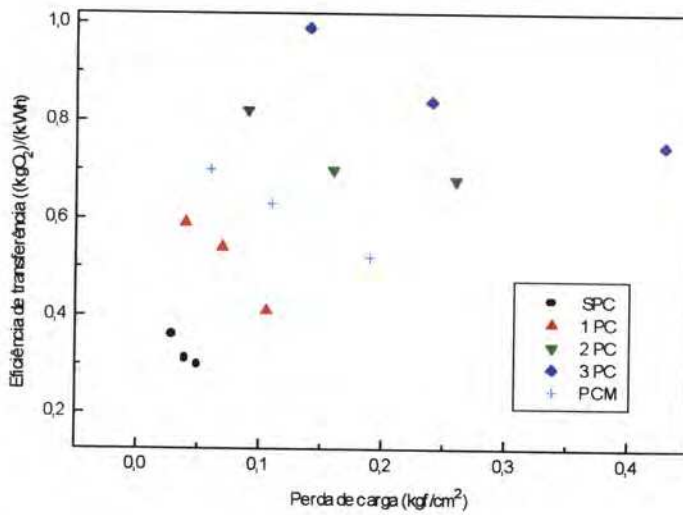


FIGURA 4.20 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga (em três níveis de vazão de líquido) a 35°C e vazão de ar de 383,0 ml/min.

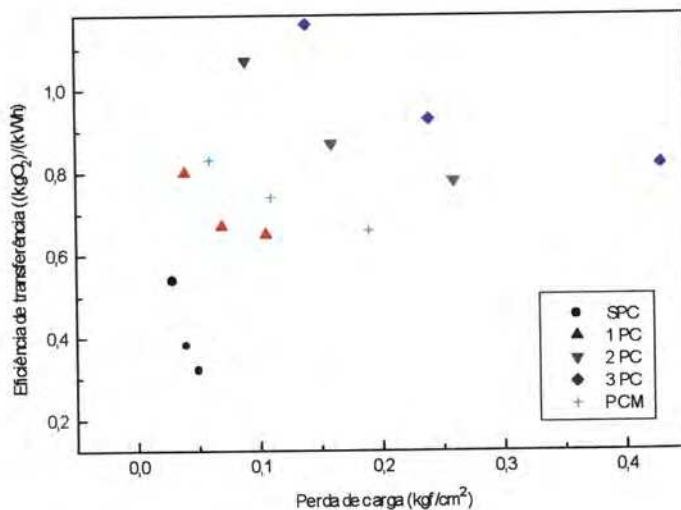


FIGURA 4.21 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga (em três níveis de vazão de líquido) a 20°C e vazão de ar de 522,0 ml/min.

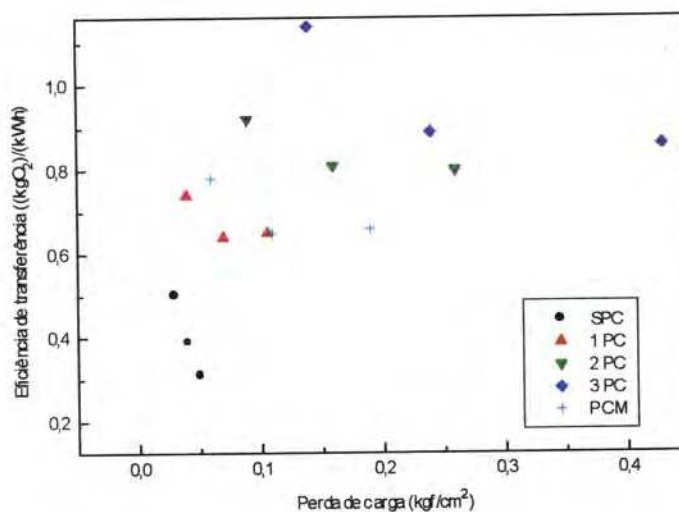


FIGURA 4.22 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga (em três níveis de vazão de líquido) a 30°C e vazão de ar de 522,0 ml/min.

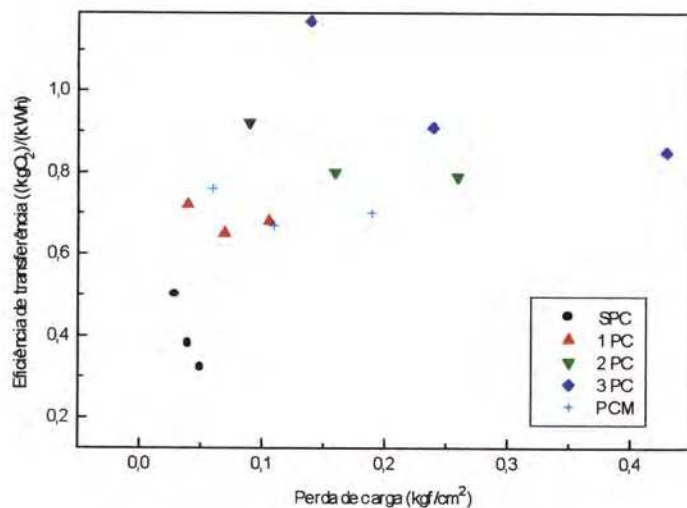


FIGURA 4.23 - Eficiência de transferência de oxigênio em função da perda de carga (em três níveis de vazão de líquido) a 35°C e vazão de ar de 522,0 ml/min.

4.6 – Comportamento dos Números Adimensionais

A eficiência da transferência da unidade de aeração e o coeficiente de transferência de massa foram relacionados com alguns números adimensionais. Os outros adimensionais obtidos não forneceram relações que permitissem elucidar o fenômeno de transferência de massa bem como a eficiência da unidade de aeração. As variações entre as condições experimentais, que se confirmaram com algumas repetições, determinaram comportamentos ligeiramente diferentes entre as possíveis curvas dos gráficos, não sendo possível reuni-las em um único modelo matemático.

4.6.1 – Razão ar/líquido

4.6.1.1 – Eficiência de transferência de oxigênio em função da razão ar/líquido (ϕ)

O número adimensional Q_A/Q_L em função da eficiência de transferência da unidade de aeração foram plotados nas figuras 4.24 a 4.26, respectivamente nas temperaturas de 20, 30 e 35°C e os resultados apresentaram tendência de aumento da eficiência com o aumento da razão ar/líquido, com e sem a utilização de peças cisalhantes. Estes resultados estão apresentados na tabela do APÊNDICE C.

De acordo com as figuras 4.24 A 4.26 foi verificado que as eficiências obtidas nos experimentos em que foram utilizados 3 PCM. foram superiores em relação aos que utilizaram 1 PC e inferiores aos obtidos com 2 ou 3 PC. Nestas figuras observou-se que quando a vazão de ar aumentou de 198,0 para 383 ml/min (APÊNDICE C), ocorreu um salto na eficiência de transferência da unidade de aeração, apesar da razão Q_A/Q_L Ter permanecido aproximadamente constante, ou seja, com o aumento da vazão de ar e de líquido, ocorreu cisalhamento mais intenso produzindo bolhas menores e consequentemente maior contato entre as fases.

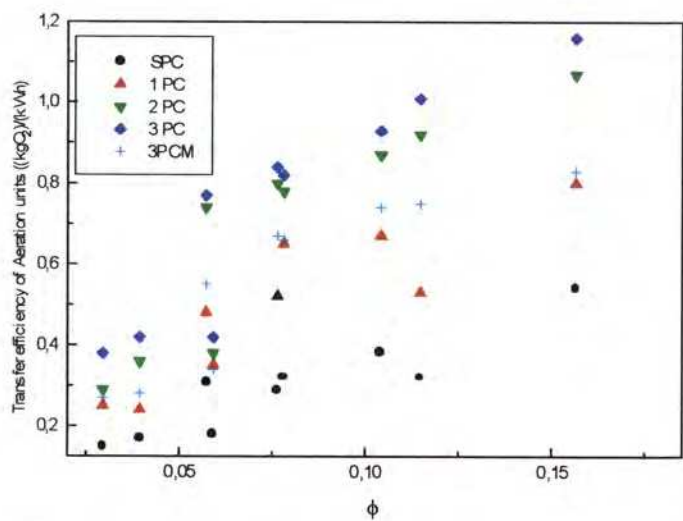


FIGURA 4.24 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função da razão volumétrica ar/líquido (ϕ), a 20°C, com e sem a utilização de peças cisalhantes.

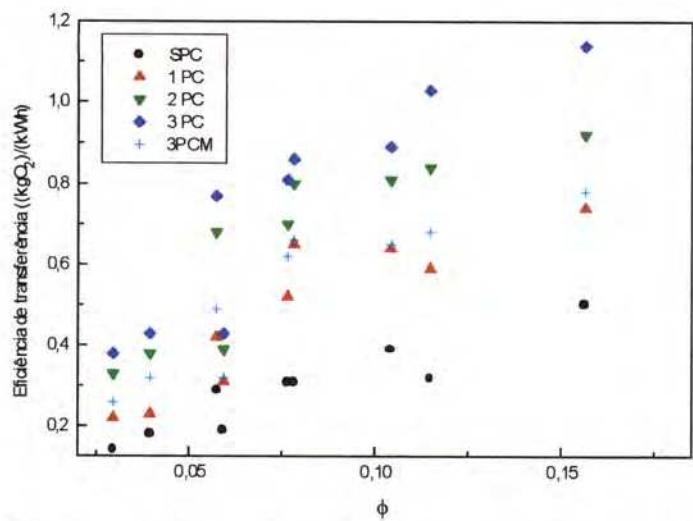


FIGURA 4.25 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função da razão volumétrica ar/líquido (ϕ), a 30°C, com e sem a utilização de peças cisalhantes.

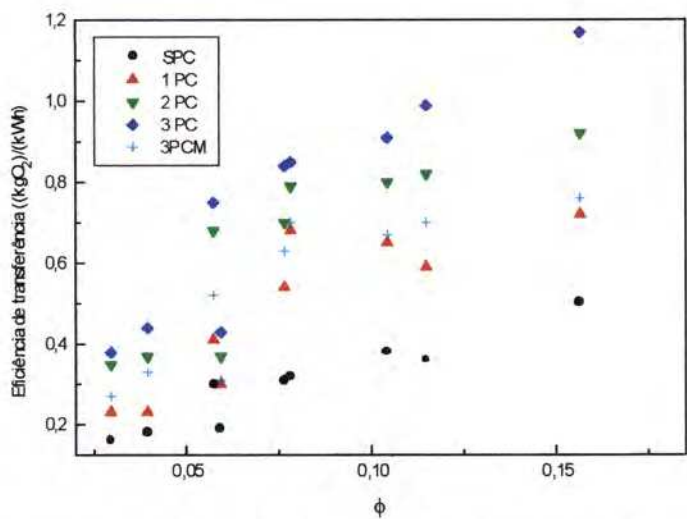


FIGURA 4.26 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função da razão volumétrica ar/líquido (ϕ), a 35°C, com e sem a utilização de peças cisalhantes.

4.6.1.2 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{1a}) em função da razão ar/líquido

Para melhor visualização da influência da vazão de ar sobre o coeficiente volumétrico de transferência de massa, as figuras 4.27 a 4.41 relacionaram o k_{1a} com a razão ar/líquido (ϕ). Estes resultados estão apresentados no APÊNDICE D. Verificou-se que para uma mesma vazão de ar ocorreu uma diminuição do k_{1a} com o aumento da razão ϕ , devido à diminuição da vazão de líquido.

Observa-se claramente uma tendência de obtenção de maiores valores de k_{1a} à medida que se aumenta a vazão de ar.

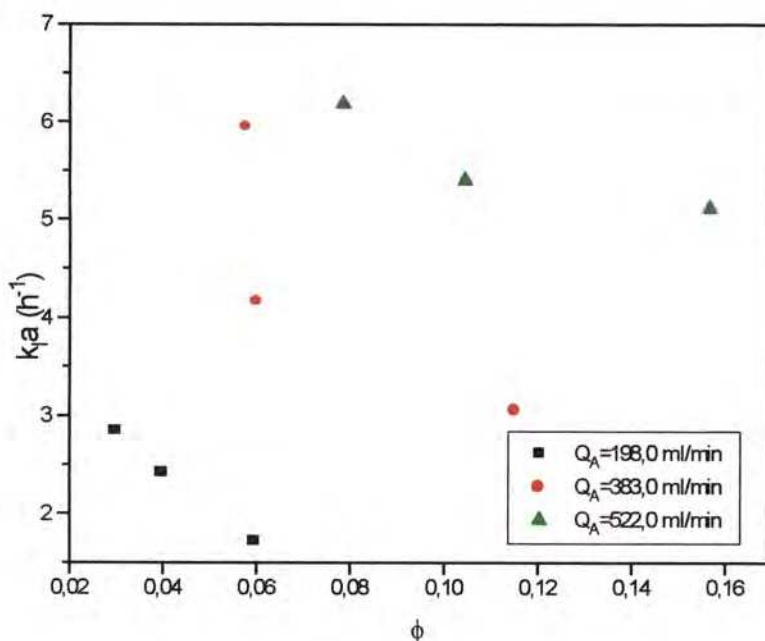


FIGURA 4.27 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{1a}) em função da razão ar/líquido (ϕ) sem a utilização de peças cisalhantes a 20°C.

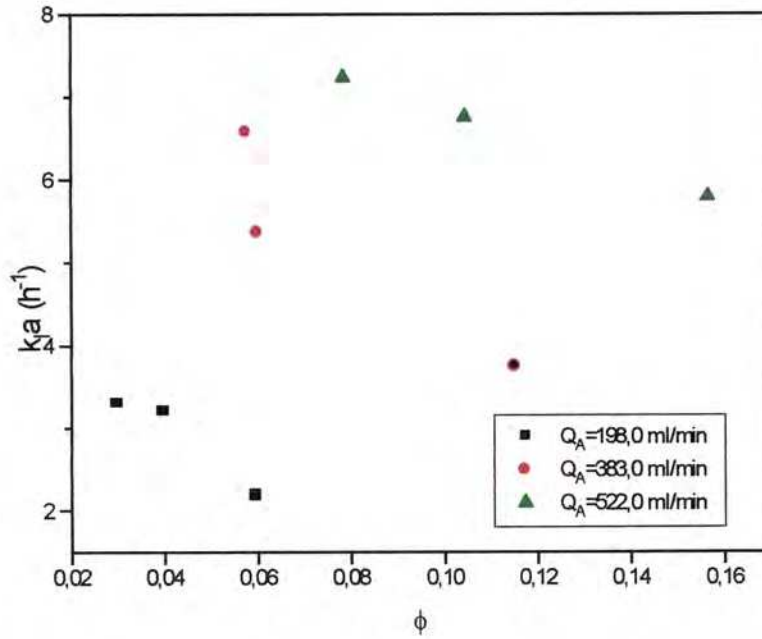


FIGURA 4.28 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{La}) em função da razão ar/líquido (ϕ) sem a utilização de peças cisalhantes a 30°C.

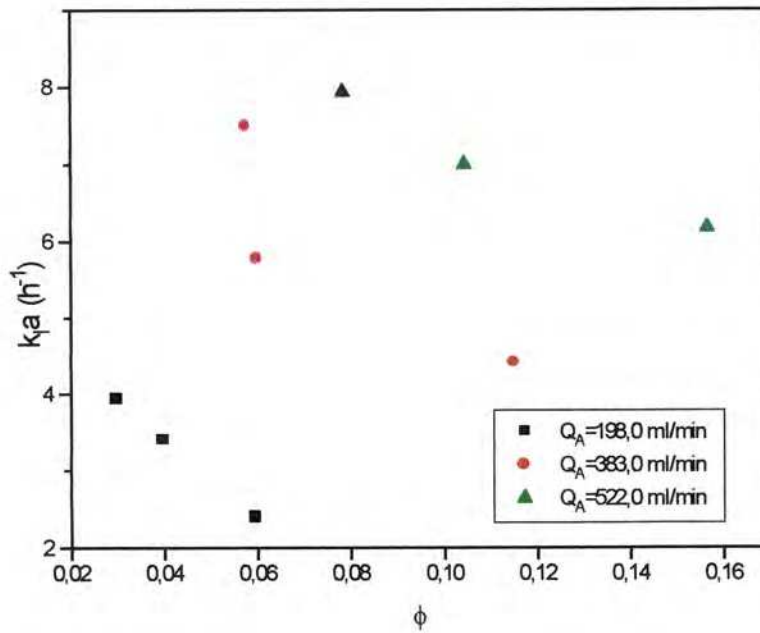


FIGURA 4.29 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{La}) em função da razão ar/líquido (ϕ) sem a utilização de peças cisalhantes a 35°C.

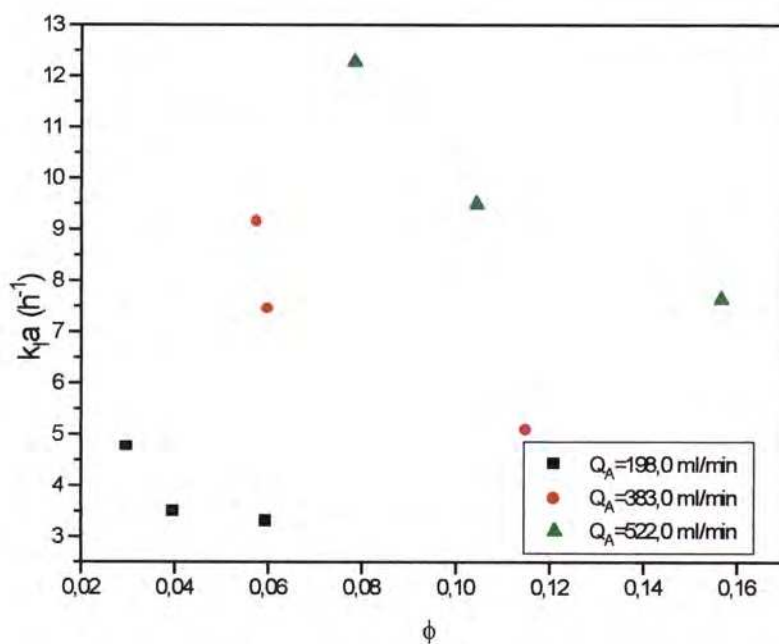


FIGURA 4.30 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{La}) em função da razão ar/líquido (ϕ) utilizando 1 peça cisalhante a 20°C.

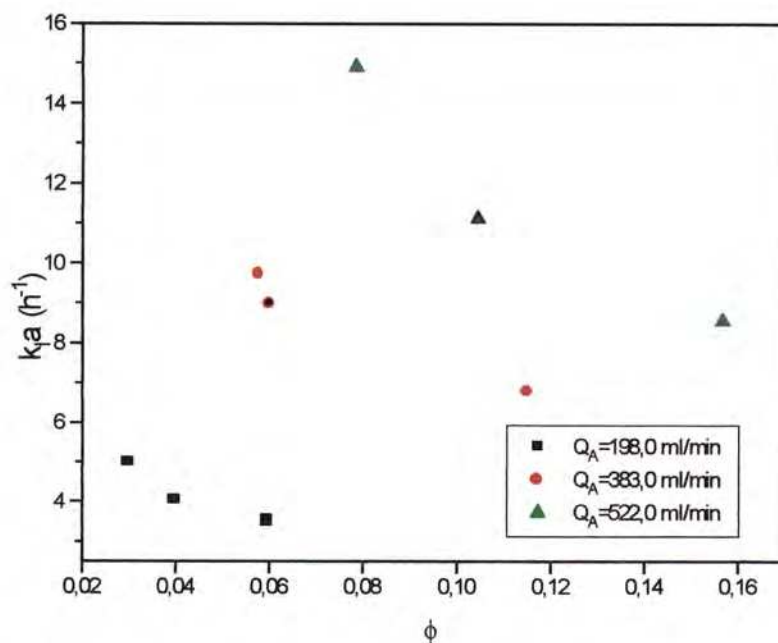


FIGURA 4.31 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{La}) em função da razão ar/líquido (ϕ) utilizando 1 peça cisalhante a 30°C.

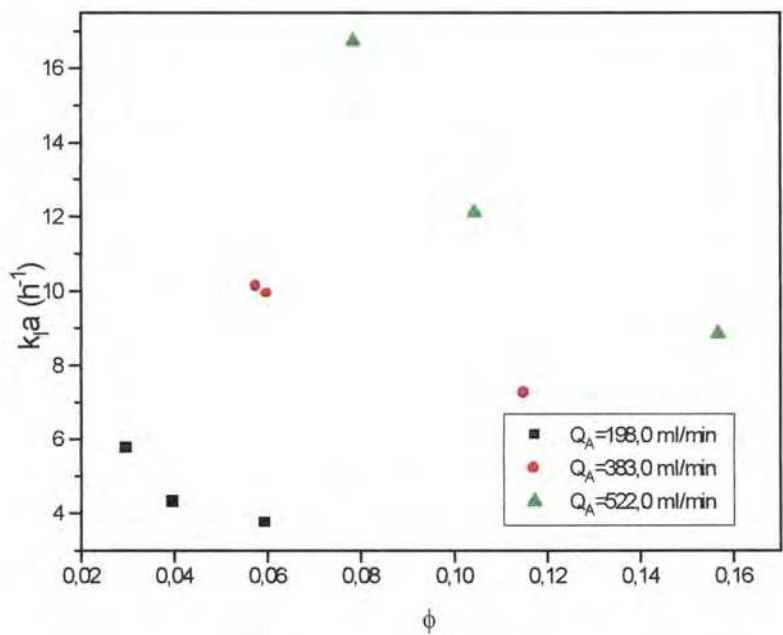


FIGURA 4.32 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_La) em função da razão ar/líquido (ϕ) utilizando 1 peça cisalhante a 35°C.

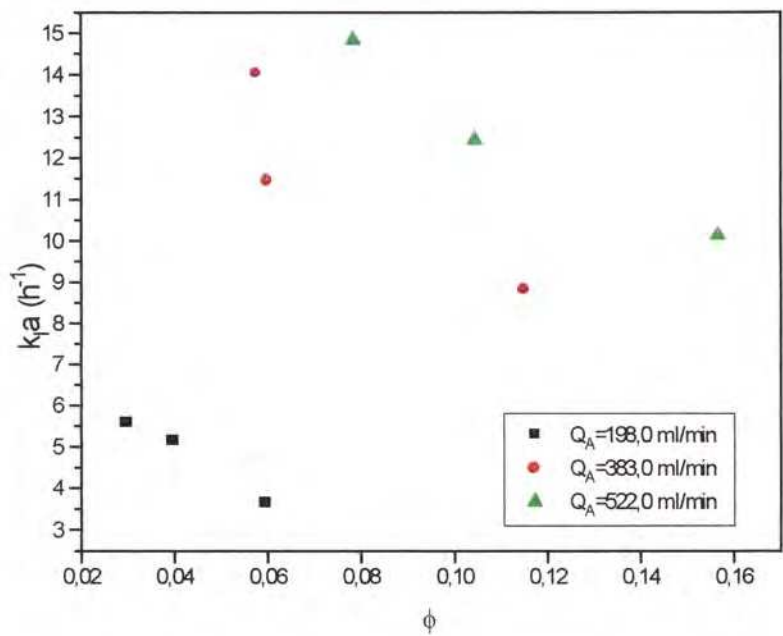


FIGURA 4.33 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_La) em função da razão ar/líquido (ϕ) utilizando 2 peças cisalhantes a 20°C.

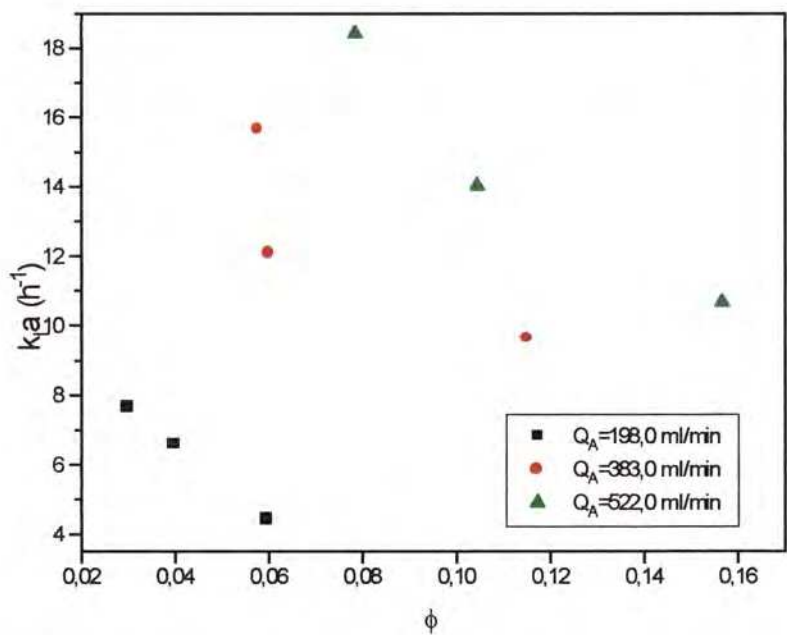


FIGURA 4.34 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{La}) em função da razão ar/líquido (ϕ) utilizando 2 peças cisalhantes a 30°C.

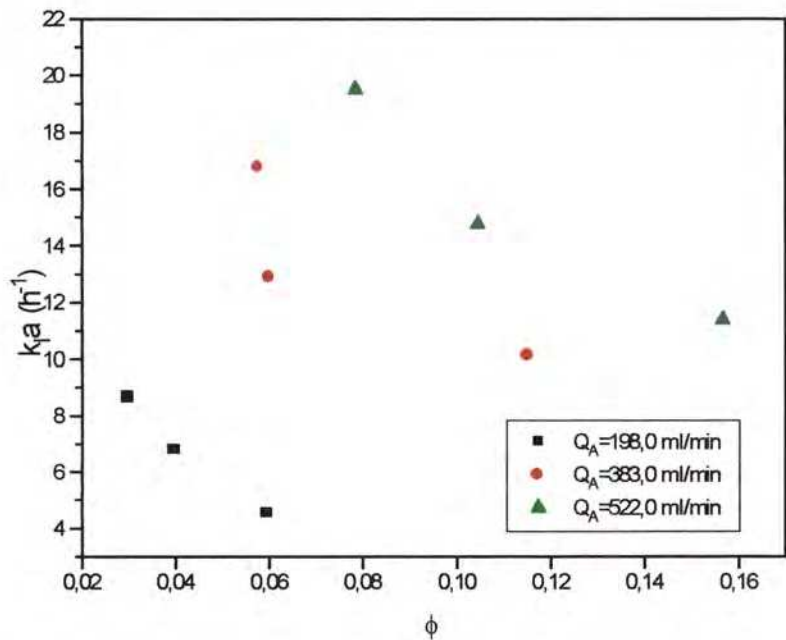


FIGURA 4.35 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{La}) em função da razão ar/líquido (ϕ) utilizando 2 peças cisalhantes a 35°C.

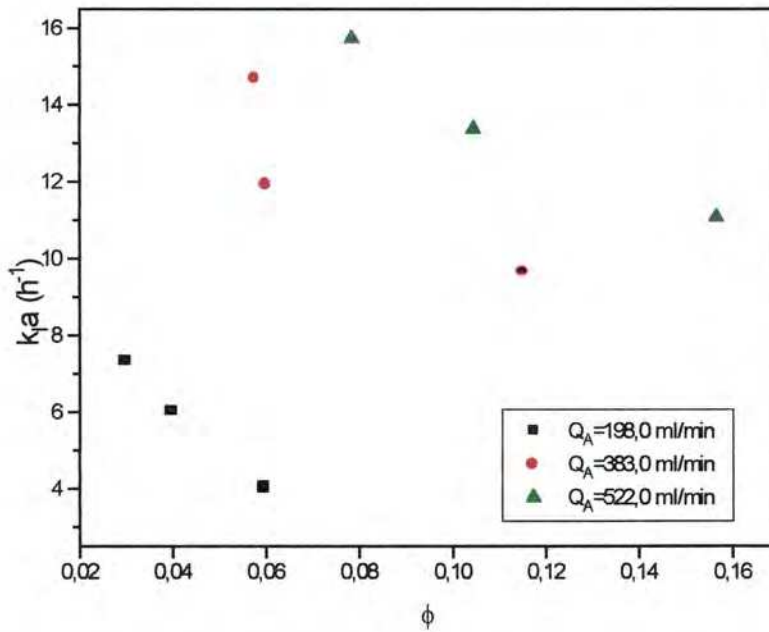


FIGURA 4.36 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{La}) em função da razão ar/líquido (ϕ) utilizando 3 peças cisalhantes a 20°C.

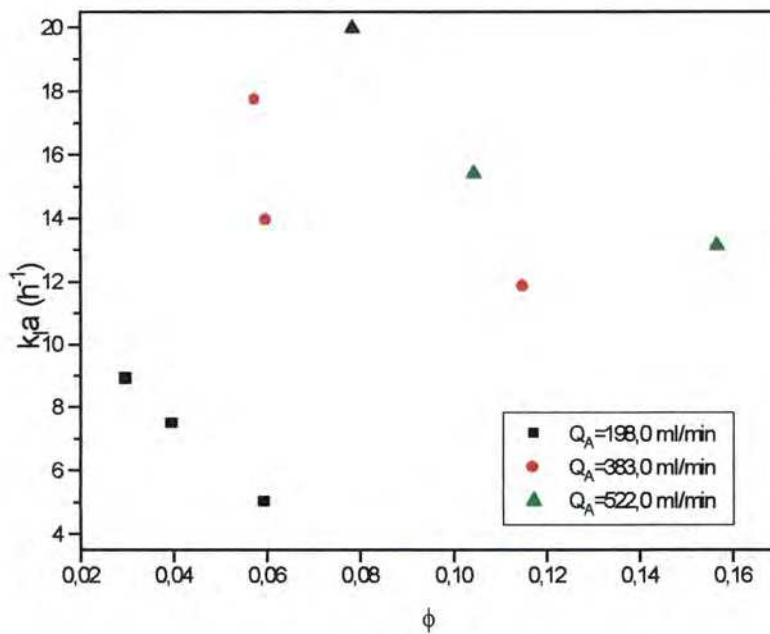


FIGURA 4.37 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{La}) em função da razão ar/líquido (ϕ) utilizando 3 peças cisalhantes a 30°C.

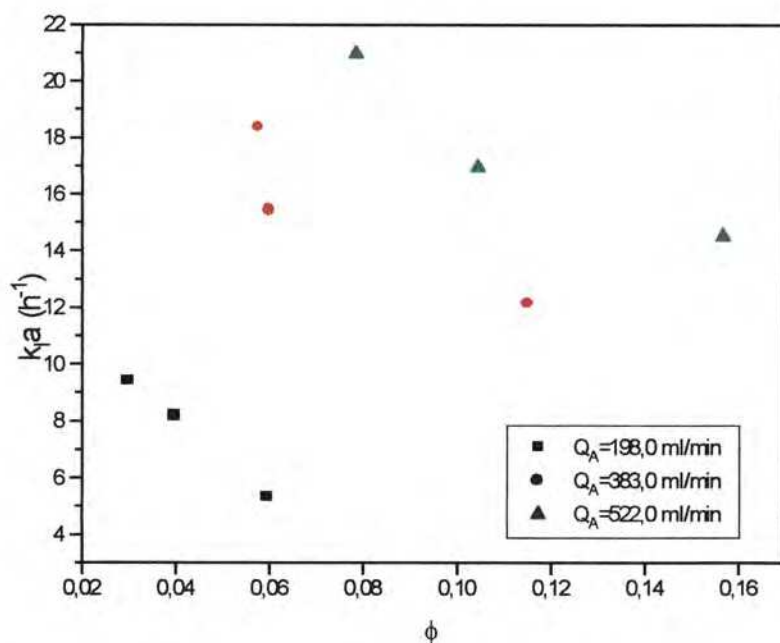


FIGURA 4.38 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{La}) em função da razão ar/líquido (ϕ) utilizando 3 peças cisalhantes a 35°C.

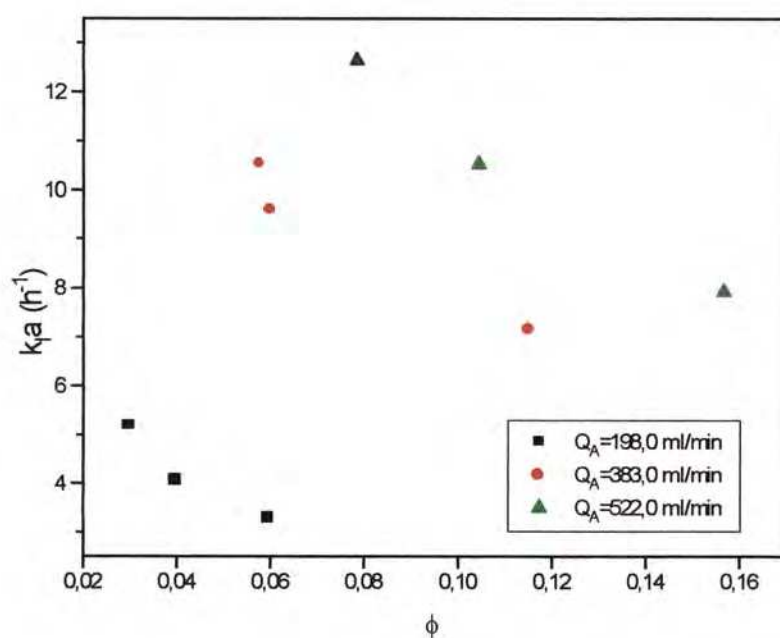


FIGURA 4.39 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_{La}) em função da razão ar/líquido (ϕ) utilizando 3 peças cisalhantes menores a 20°C.

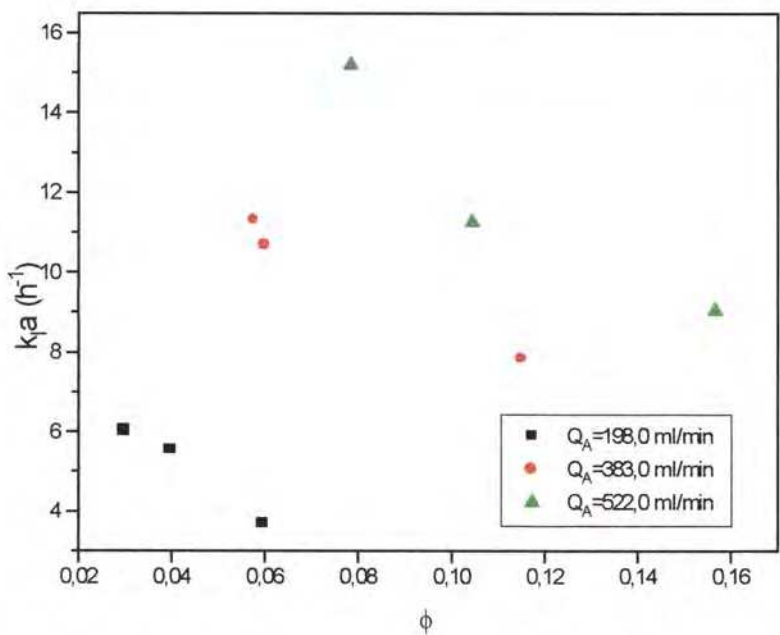


FIGURA 4.40 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_La) em função da razão ar/líquido (ϕ) utilizando 3 peças cisalhantes menores a 30°C.

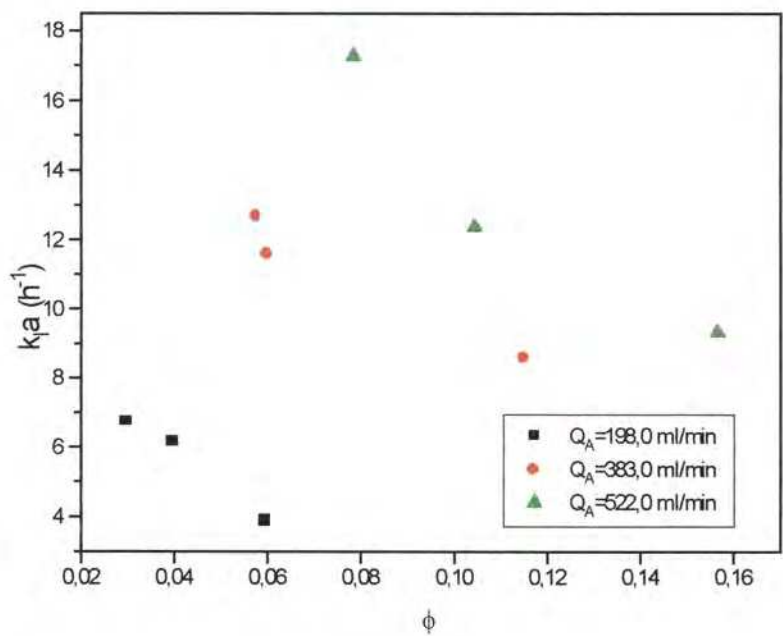


FIGURA 4.41 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_La) em função da razão ar/líquido (ϕ) utilizando 3 peças cisalhantes menores a 35°C.

4.6.2 – Vazão de Ar em Função do Número Adimensional $Q_L/(L^3k_{La})$

As figuras 4.42 a 4.50 mostram o comportamento do número adimensional $Q_L/(L^3k_{La})$ em função da vazão de ar. Foram encontrados valores menores do número adimensional $Q_L/(L^3k_{La})$ utilizando 3 PC e nas vazões de ar mais elevadas, consequentemente onde foram obtidos os maiores valores do coeficiente volumétrico de transferência de massa, que é inversamente proporcional ao adimensional. Os resultados da vazão de ar em função do adimensional estão apresentados no APÊNDICE E

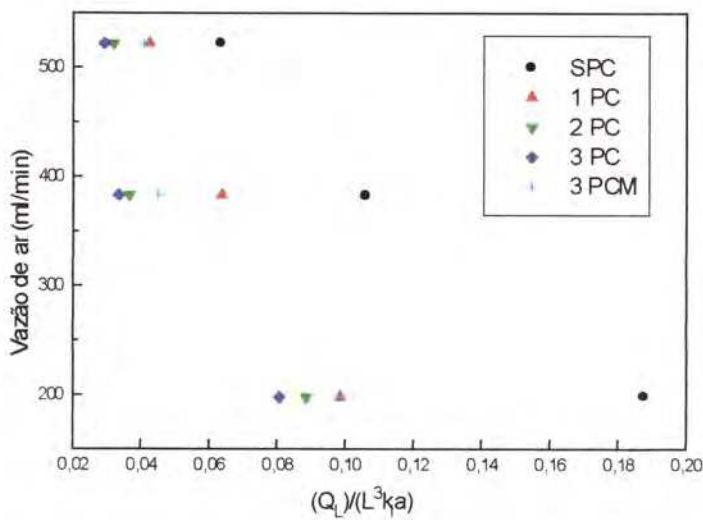


FIGURA 4.42 - Número adimensional $Q_L/(L^3k_{La})$ em função da vazão de ar, a 20°C e vazão de líquido de 200 l/h.

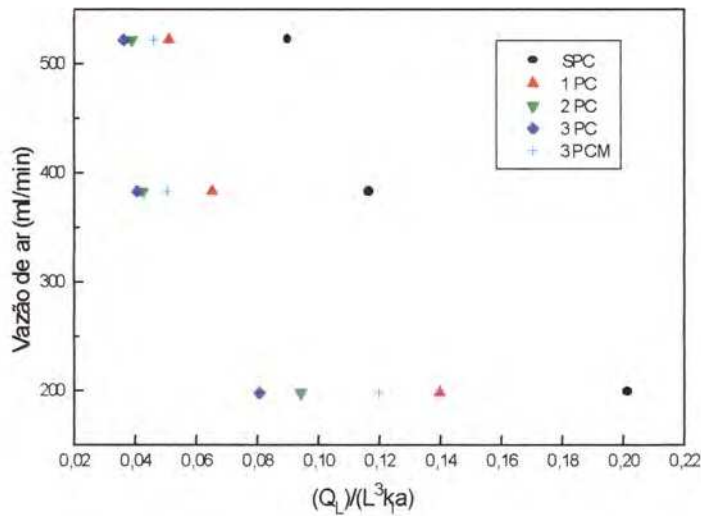


FIGURA 4.43 - Número adimensional $Q_L/(L^3 k_a)$ em função da vazão de ar, a 20°C e vazão de líquido de 300 l/h.

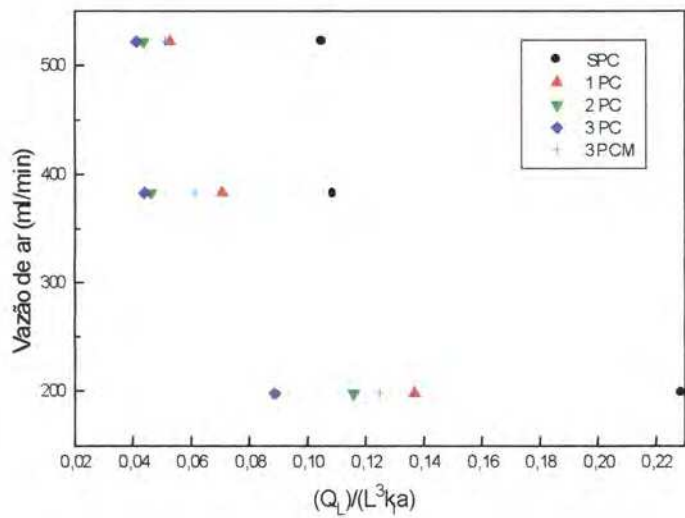


FIGURA 4.44 - Número adimensional $Q_L/(L^3 k_a)$ em função da vazão de ar, a 20°C e vazão de líquido de 400 l/h.

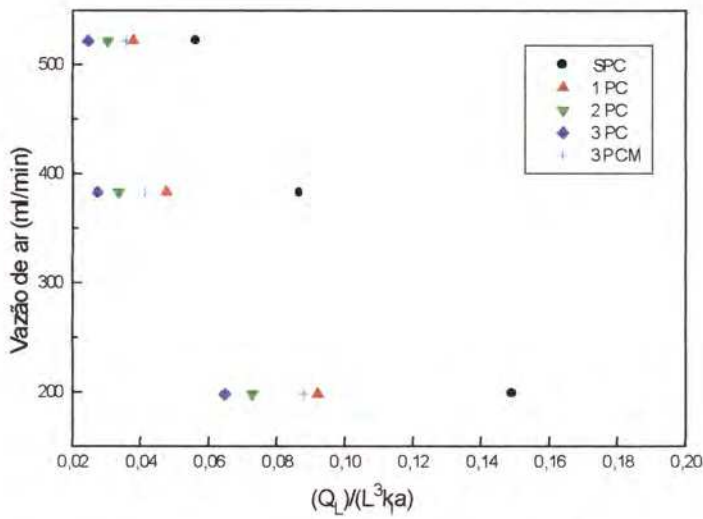


FIGURA 4.45 - Número adimensional $Q_L/(L^3 k_a)$ em função da vazão de ar, a 30°C e vazão de líquido de 200 l/h.

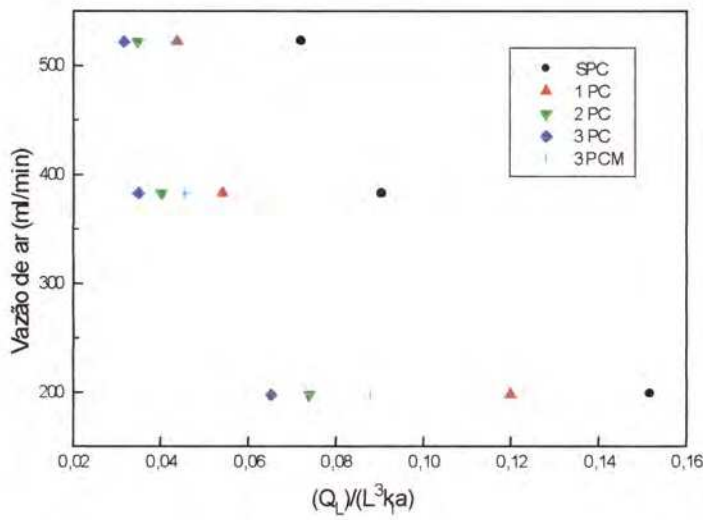


FIGURA 4.46 - Número adimensional $Q_L/(L^3 k_a)$ em função da vazão de ar, a 30°C e vazão de líquido de 300 l/h.

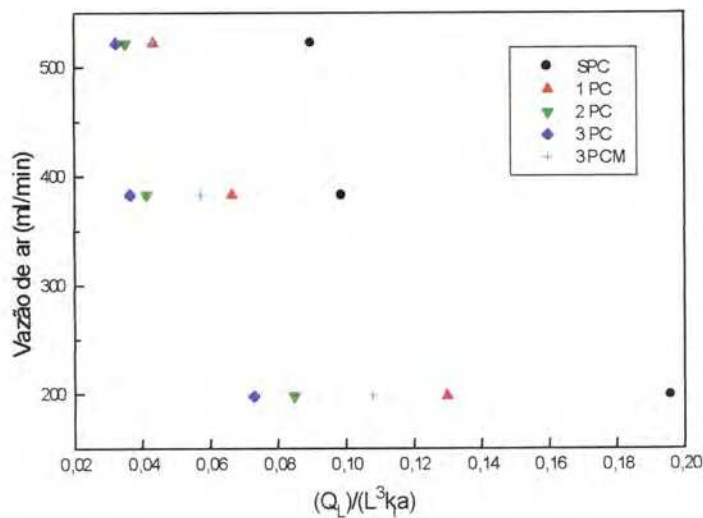


FIGURA 4.47 - Número adimensional $Q_L/(L^3 k_a)$ em função da vazão de ar, a 30°C e vazão de líquido de 400 l/h.

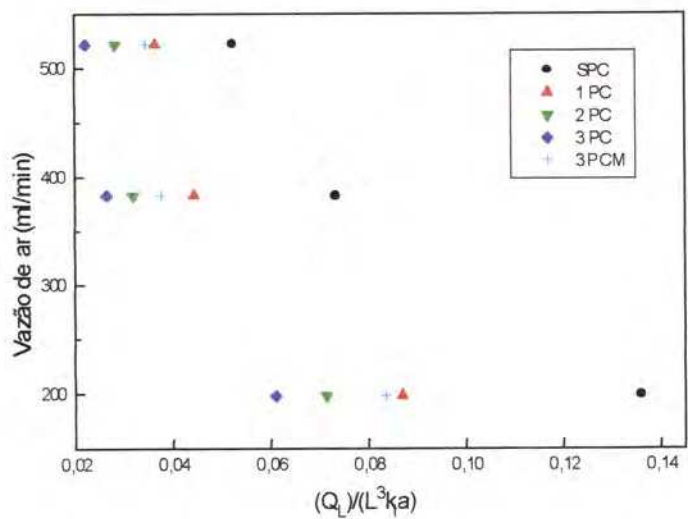


FIGURA 4.48 - Número adimensional $Q_L/(L^3 k_a)$ em função da vazão de ar, a 35°C e vazão de líquido de 200 l/h.

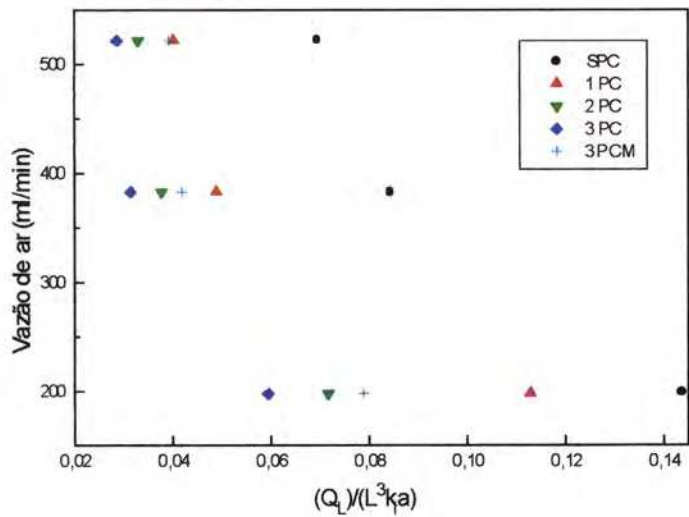


FIGURA 4.49 - Número adimensional $Q_L/(L^3 k_{La})$ em função da vazão de ar, a 35°C e vazão de líquido de 300 l/h.

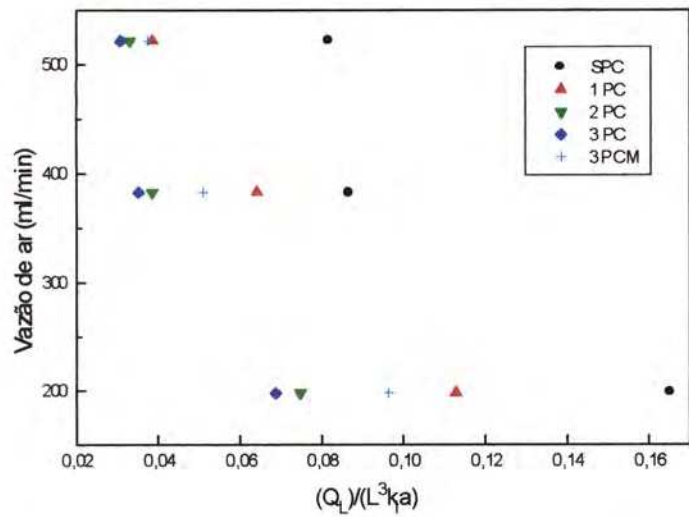


FIGURA 4.50 - Número adimensional $Q_L/(L^3 k_{La})$ em função da vazão de ar, a 35°C e vazão de líquido de 400 l/h.

4.6.3 – Eficiência da unidade de Aeração (TE) em Função do Adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$.

4.6.3.1 – Tensão Superficial

A tensão superficial da solução aquosa de sulfito de sódio foi calculada de acordo com GONÇALVES (1968), tendo referência água destilada como líquido de tensão superficial conhecida. Realizou-se a contagem das gotas, com repetição, na temperatura ambiente, da água destilada e da solução, utilizando a mesma seringa. Os dados da tensão superficial da água a 20, 30 e 35°C foram obtidos de tabela do PERRY (1984). A tensão superficial da solução na temperatura ambiente foi calculada através da equação 22 (lei de Tates) e corrigida de acordo com as tensões superficiais da água nas demais temperaturas.

TABELA 4.6 Resultados da tensão superficial da água e da solução nas três temperaturas.

Temperatura (°C)	Tensão Superficial (N/m)	
	Água	Solução
20	0,071812	0,078133
30	0,071196	0,077463
35	0,07033	0,076524

De acordo com a medida da tensão superficial realizada da solução aquosa e sulfito, conforme o item 3.5.1, foi comprovado que o sulfito, utilizado para a desoxigenação da água alterou muito pouco a tensão superficial da água, comportamento também relatado na literatura por JACKSON & COLLINS (1964).

Para as diferentes tensões obtidas em 20, 30 e 35°C e diferentes vazões de líquido foi plotado o adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ em função da eficiência de transferência de oxigênio (os valores estão apresentados no APÊNDICE F). Foi observado através das

FIGURAS 4.51 a 4.59 que em cada condição de peças (com e sem) ocorreu uma tendência ao declínio da eficiência com o aumento da vazão de líquido.

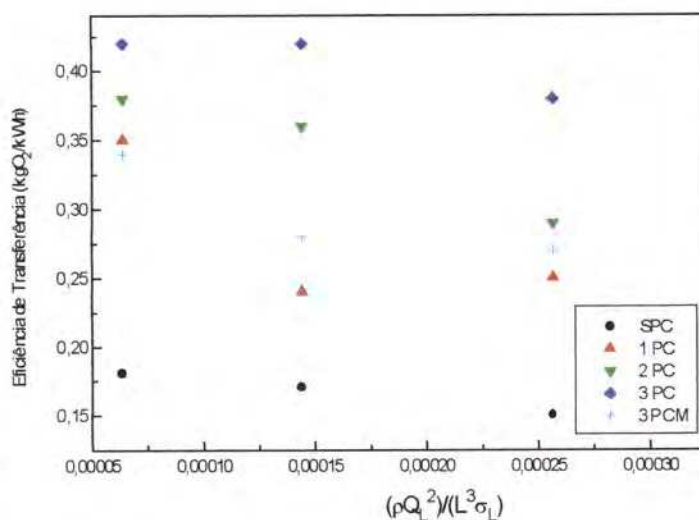


FIGURA 4.51 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do líquido do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ a 20°C e vazão de ar de 198,0ml/min

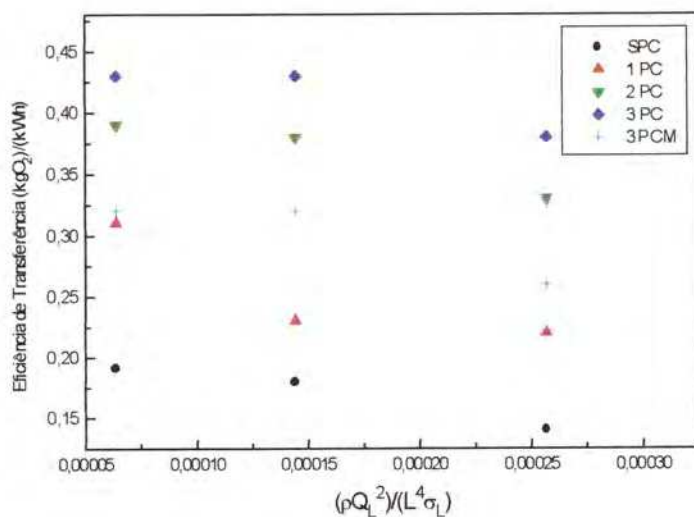


FIGURA 4.52 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^4 \sigma_L)$ a 30°C e vazão de ar de 198,0ml/min

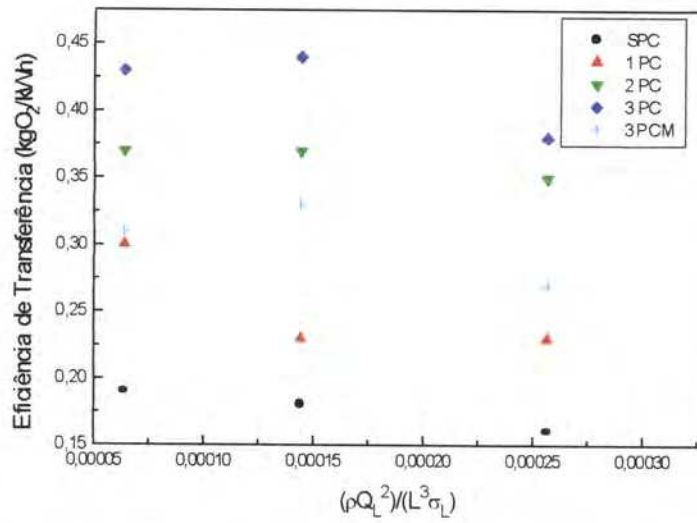


FIGURA 4.53 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ a 35°C e vazão de ar de 198,0ml/min.

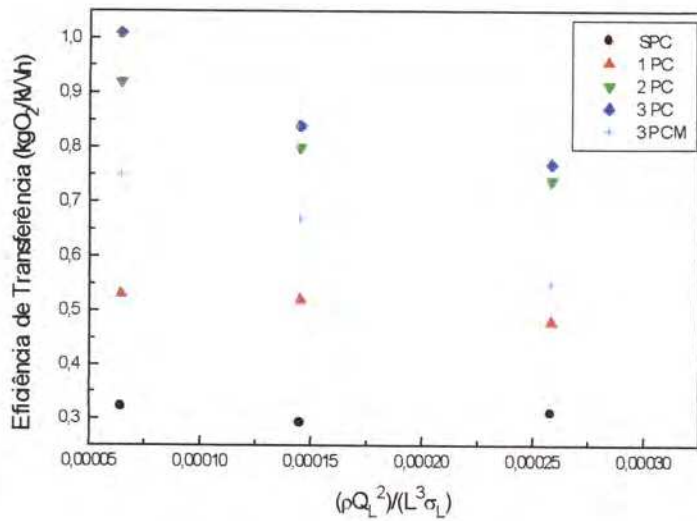


FIGURA 4.54 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ a 20°C e vazão de ar de 383,0ml/min.

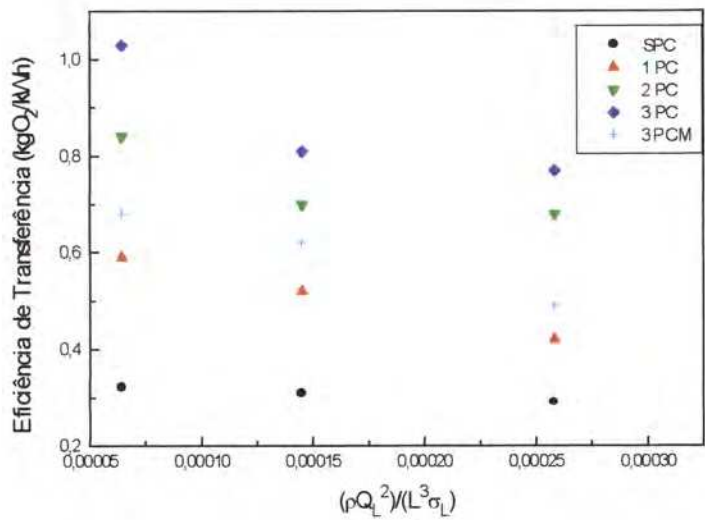


FIGURA 4.55 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ a 30°C e vazão de ar de 383,0ml/min.

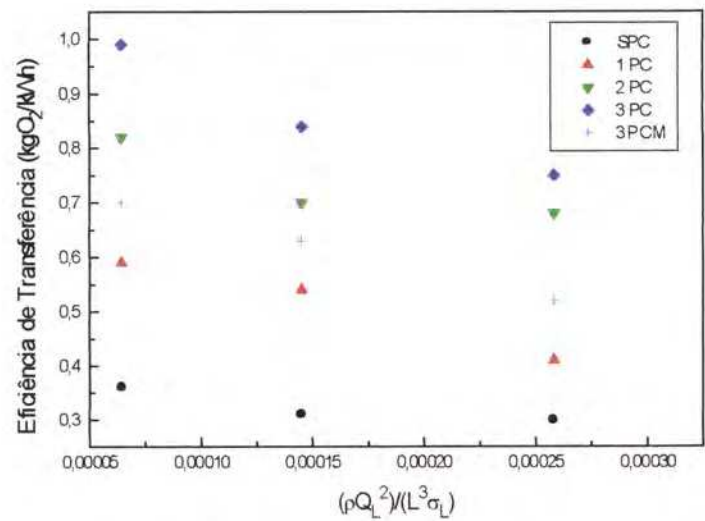


FIGURA 4.56 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ a 35°C e vazão de ar de 383,0ml/min

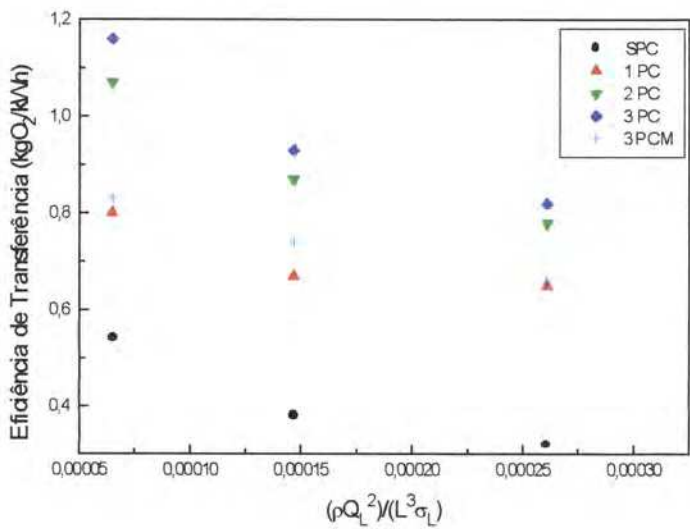


FIGURA 4.57 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do líquido do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ a 20°C e vazão de ar de 522,0ml/min

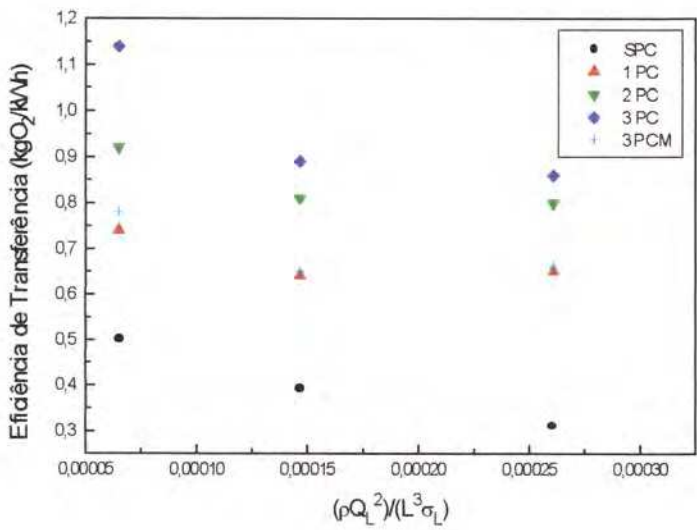


FIGURA 4.58 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do líquido do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ a 30°C e vazão de ar de 522,0ml/min

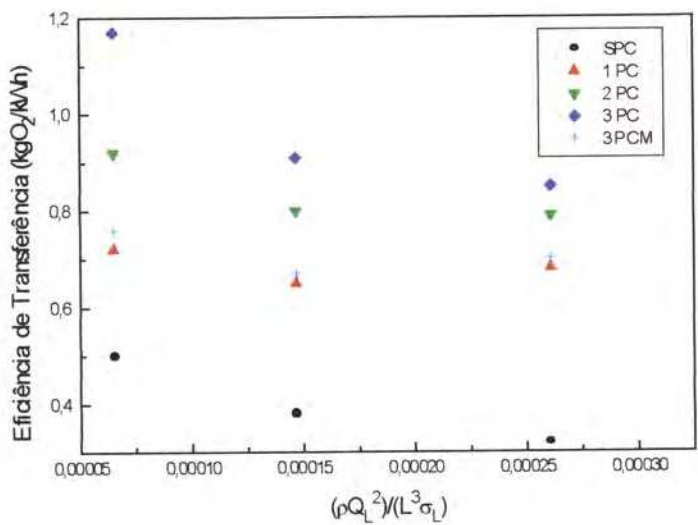


FIGURA 4.59 – Eficiência de transferência de massa do sistema em função do adimensional $(\rho Q_L^2)/(L^3 \sigma_L)$ a 35°C e vazão de ar de 522,0ml/min

5 - CONCLUSÕES

1. Com adição de peças cisalhantes ao sistema o coeficiente de transferência de massa e a eficiência de transferência de oxigênio da unidade de aeração aumentaram.
2. Com o aumento da vazão de líquido, para uma certa temperatura, o coeficiente de transferência de massa aumentou e a eficiência de transferência de oxigênio da unidade de aeração diminuiu.
3. Com o aumento da vazão de ar o coeficiente de transferência de massa e a eficiência de transferência da unidade de aeração aumentaram.
4. Com o aumento da temperatura o coeficiente volumétrico de transferência de massa aumenta
5. A adição de sulfito à água não interfere na sua tensão superficial.
6. As variações entre as condições experimentais, que se confirmaram com algumas repetições, determinaram comportamentos ligeiramente diferentes entre as possíveis curvas dos gráficos, não sendo possível reuni-las em um único modelo matemático.

6- BIBLIOGRAFIA

- BANDO, Y.; KURAISHI, M.; NISHIMURA, M.; HATTORI, M. & TAKESSHITA, I. The Characteristics of a Flow Bubble Column with a Gas-Suction-Type, Simultaneous Gas-Liquid Injection-Nozzle. **International Chemical Engineering**. v. 30, n. 4, p. 729-737, 1990.
- BAILEY, J. E. & OLLIS, D. F. Transport Phenomena in Bioprocess Systems. **Biochemical Engineering Fundamentals**. Mc Graw-Hill International Editions, 1986.
- BELLO, R. A.; ROBINSON, C. W.; MOO-YOUNG, M. Gas Holdup and Overall Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in AirLift Contactors. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 27, p. 369-381, 1984.
- CHUGH, R. K. & KUMAR, B. Heat and Particulate Recovery from Spray Dryer Exhaust Using Vertical Venturi Scrubber. **Journal of Food Science and Technology**, v. 21, p. 232-233, 1984.
- CRAMERS, P. H. M. R.; BEENACKERS, A. A. C. M. & DIERENDONCK, L. L. Hydrodynamics and Mass Transfer characteristics of a Loop-Venturi Reactor with a Downflow Liquid Ejector. **Chemical Engineering Science**. v. 47, n. 13/14, p. 3557-3564, 1992a.
- CRAMERS, P. H. M. R.; DIERENDONCK, L. L. & BEENACKERS, A. A. C. M. Influence of the Gas Density on the Gas Entrainment Rate and Gas Holdup in Loop-Venturi Reactors. **Chemical Engineering Science**. v. 47, n. 9-11, p. 2251-2256, 1992b.
- DIRIX, C. A. M. C. & WIELE, K. Mass Transfer in Jet Loop Reactors. **Chemical Engineering Science**. v. 45, n. 8, p. 2333-2340, 1990.

- DUSSAP, G. & GROS, J. B. Energy Consumption and Interfacial Mass Transfer Area in an Air-Lift Fermentor. **Chemical Engineering Journal**. v.25, p. 151-162, 1982.
- DUTTA, N. N. & RAGHAVAN, K. V. Mass Transf and Hydrodynamic Characteristics of Loop Reactores with Downflow Liquid Jet Ejector. **The Chemical Engineering Journal**. v. 36, p. 111-121, 1987.
- ECKENFELDER, W. W. **Chem. Eng. Prog.**, v.52, p.286, 1956.
- GASNER, L. L. Development and Application of the thin Channel Rectangular Air-Lift Mass Transfer Reactor to Fermentation and Waste-Water Treatment Systems. **Biotechnology and Bioengineering**, v.16, p. 1179-1195, 1974.
- GONÇALVES, D. **Física do científico e do vestibular**. 5ª edição. Rio de Janeiro – Brasil: AO LIVRO TÉCNICO S.A., 1968.
- GHOSH, T. K., BHATTACHARYYA, B. C. Effect of Inlet Oxygen Concentration on Continuous Cultivation of Baker's Yeast in a Convergin-Diverging Tube Airlift Fermentor. **Journal of Fermentation and Bioengineering**. v.76, nº2, p. 153-156, 1993.
- HEIJNEN, J. J.; Van LOOSDRECHT, M. C. M.; MULDER, A. & TIJHUIS, L. Formation of Biofilms Air-Lift Suspension Reactor. **Water Science and Technology**. v. 26, n. 3-4, p. 647-654, 1992.
- JACKSON, M.L.; COLLINS, W.D. Scale-up of a venturi aerator. **I&EC Process Design and Development**, v. 3, n. 4, out. 1964.
- LAURENT, A.C.; FONTEIX, C.; CHAPENTIER, J.C. Simulation of a Pilot Scale, Liquid Motivated, Venturi Jet Scrubber by a Laboratory Scale Model. **AICHE Journal**, v.26, n.2, p.282-287, 1980.

- METCALF & EDDY, Inc. **Wastewater Engineering: treatment, disposal, reuse**. 2ª edição revisada por G. Tchonglous. New Delhi: Tata McGraw Hill Publ. Company, 1987. 920 p.
- MOHAMED, P. A. M. S. G. & JAMESON, G. J. Hydrodynamics of a Radial Jet Inductor. **Chemical Engineering Science**. v.48, n. 3 p. 489-501, 1993.
- MORAES JÚNIOR, D. Transporte de líquidos e gases. São Carlos: Gráfica da Universidade Federal de São Carlos, 1988. Volume 1. 148 p
- MORESI, M.; GIANTURCO, G. B. & SEBASTIANI, E. The Ejector-Loop Fermenter: Description and Performance of the Apparatus. **Biotechnology and Bioengineering**, v.25, p. 2889-2904, 1983.
- PERRY, R. H. **Chemical Engineers' Handbook**. Sixth Edition. Mc Graw-Hill International Editions, cap 10-7, 1986.
- PINEDO, A. A. Projeto e Desempenho de um Reator de Recirculação para Hidrogenação. Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Alimentos. Campinas - S.P., 1995.
- PROKOP, A.; JANIK, P.; SOBOTKA, M. & KRUMPHANZL, V. Hydrodynamics, Mass Transfer, Yeast Culture Performance of a Column Bioreactor with Ejector. **Biotechnology and Bioengineering**, v.25, p. 1147-1160, 1983.
- RADHAKRISHNAN, V. R. & MITRA, A. K. Pressure Drop, Holdup and Interfacial Area in Vertical Two-Phase Flow of Multi-Jet Ejector Induced Dispersions. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 62, p.170-178, 1984.
- RAMALHO, R. S. **Introduction to waste treatment processes**. 2ª edição. New York: Academic Press, 1983.

- SHAMLOU, P.A.; POLLARD, A.P.I.; LILLYM.D. Gas Holdup and Liquid Circulation Rate in Concentric-Tube Air-Lift Bioreactors. **Chemical Engineering Science**, v.49,n.3, p.303-312, 1993.
- SIEGEL, M. H. & MERCHUK, J. C. In a Rectangular Air-Lift Reactor: Effects of Geometry and Gas Recirculation. **Biotechnology and Bioengineering**, v.32, pp. 1128-1137, 1988.
- SIEGEL, M. H.; BRENNER, A.; MERCHUK, J. C. & FRIEDMAN, M. Gas Holdup, Mass Transfer, and Treatment Efficiency of an Upflow Sludge Blanket Sequencing Batch Air-Lift Reactor for Treatment of High Strength Domestic Wastewaters. **Trans IchemE**. v. 72, p. 35-41, 1994.
- SOLFRANK, B. & SOMMER, K Effektivität der flotativen Abscheidung von Kühltrub aus Bierwürze bei verschiedenen Belüftungsorganen. **Monatsschrift für Brauwissenschaft**. Heft 9, z. 364-368, 1989.
- STEJSKAL, J. & POTUCEK, F. Oxygen Transfer in Liquids. **Biotechnology and Bioengineering**, v.27, p. 503-508, 1984.

APÊNDICE A

TABELA A1 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
Q _A - 198,0 (ml/min)		Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
T A - 30°C		T A - 30°C	T A - 29°C
TEMPO(s)	PA - 708 (mmHg)	PA - 711 (mmHg)	PA - 708 (mmHg)
30	0,18	0,29	0,40
60	0,23	0,52	0,80
90	0,28	0,77	1,18
120	0,35	0,92	1,53
150	0,43	1,18	1,79
180	0,54	1,43	2,06
210	0,65	1,72	2,35
240	0,76	2,00	2,60
270	0,87	2,22	2,85
300	1,01	2,45	3,06
330	1,16	2,61	3,22
360	1,28	2,88	3,34
390	1,41	3,01	3,61
420	1,52	3,14	3,87
450	1,66	3,30	4,05
480	1,88	3,45	4,29
510	2,02	3,58	4,45
540	2,13	3,72	4,87
570	2,26	3,87	4,89
600	2,38	3,96	5,01
630	2,54	4,04	5,09
660	2,66	4,13	5,19
690	2,74	4,22	5,25
720	2,84	4,31	5,31
750	2,86	4,40	5,35
780	3,00	4,49	5,39
810	3,12	4,58	5,43
840	3,19	4,67	5,47
870	3,30	4,71	5,50
900	3,39	4,78	5,54
930	3,45	4,83	5,58
960	3,51	4,90	5,62
990	3,61	4,98	
1020	3,64	5,06	
1050	3,75	5,13	
1080	3,83	5,18	5,72
1110	3,85	5,26	
1140	3,93	5,33	
1170	3,97	5,39	
1200	3,98	5,44	5,77
1230	4,04		

1260	4,12	5,53	
1290	4,14		
1320	4,23	5,61	
1350	4,29		
1380	4,33	5,68	
1410	4,36		
1440	4,38	5,74	5,86
1500	4,49	5,79	
1560		5,83	
1590	4,63		
1620		5,85	
1650	4,65		
1680		5,88	
1800	4,90	5,93	
1860	5,00		
1920		5,97	
1980	5,04		
2040	5,11	6,00	
2130	5,19		
2280	5,32		
2580	5,58		
2760	5,67		

TABELA A2 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A – 198,0 (ml/min)	Q _A – 383,0 (ml/min)	Q _A – 522,0 (ml/min)
	TA - 29°C	TA - 28°C	TA - 28°C
TEMPO (s)	PA – 711 (mmHg)	PA – 711 (mmHg)	PA – 713 (mmHg)
30	0,18	0,31	0,28
60	0,26	0,37	0,50
90	0,37	0,58	0,77
120	0,49	0,77	1,05
150	0,61	0,98	1,34
180	0,73	1,20	1,62
210	0,86	1,42	1,90
240	0,99	1,66	2,17
270	1,17	1,89	2,45
300	1,30	2,15	2,74
330	1,44	2,29	2,93
360	1,58	2,48	3,13
390	1,68	2,65	3,31
420	1,79	2,82	3,51
450	1,90	2,93	3,66
480	2,00	3,14	3,76
510	2,09	3,22	3,94
540	2,18	3,31	4,05
570	2,29	3,41	4,15
600	2,40	3,52	4,28
630	2,49	3,60	4,36
660	2,58	3,69	4,39
690	2,67	3,78	4,50
720	2,75	3,86	4,55
750	2,83	3,92	4,63
780	2,91	3,99	4,71
810	2,99	4,06	4,75
840	3,07	4,13	4,79
870	3,14	4,19	4,81
900	3,20	4,26	4,84
930	3,26	4,32	4,86
960	3,32	4,38	4,88
990	3,39	4,42	4,93
1020	3,46	4,47	4,96
1050	3,54	4,51	5,01
1080	3,62	4,56	5,04
1110	3,69	4,60	5,07
1140	3,75	4,64	5,10
1170	3,81	4,70	5,13
1200	3,86	4,75	5,16
1230	3,92	4,78	5,18
1260	3,97	4,82	5,21
1290	3,99		
1320	4,03		

1350	4,06		
1380	4,08		
1410		4,93	
1560		5,00	
1590			
1620	4,23	5,03	
1680			5,37
1740	4,31		
1830	4,37		
1860			5,43
1890	4,41		
1950	4,45		
2070	4,51		
2280			5,58
2310	4,61		
2910	4,83		

TABELA A3 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	T A - 30 ^o C	T A - 26 ^o C	TA - 28 ^o C
TEMPO (s)	PA -712 (mmHg)	PA -717 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)
30	0,16	0,26	0,33
60	0,25	0,33	0,55
90	0,34	0,53	0,74
120	0,43	0,66	1,00
150	0,57	0,87	1,26
180	0,67	1,14	1,62
210	0,77	1,39	1,90
240	0,89	1,61	2,17
270	1,03	1,81	2,45
300	1,17	2,04	2,8
330	1,33	2,19	3,14
360	1,5	2,43	3,37
390	1,63	2,59	3,49
420	1,79	2,76	3,59
450	1,88	2,89	3,65
480	2,00	3,08	3,72
510	2,10	3,19	3,8
540	2,21	3,30	3,87
570	2,33	3,42	3,93
600	2,42	3,52	4,09
630	2,51	3,63	4,13
660	2,64	3,71	4,20
690	2,76	3,76	4,23
720	2,86	3,83	4,32
750	2,92	3,92	4,36
780	3,00	3,96	4,38
810	3,05	4,01	4,40
840	3,11	4,08	4,47
870	3,18	4,14	4,52
900	3,27	4,20	4,55
930	3,31	4,25	4,58
960	3,33	4,30	4,62
990	3,37	4,34	4,64
1020	3,42	4,39	4,67
1050	3,48	4,44	4,70
1080	3,51	4,49	4,73
1110	3,53	4,53	4,76
1140	3,57	4,57	4,79
1170	3,62	4,61	4,81
1200	3,69	4,65	4,83
1230		4,67	4,85
1260	3,74		4,88
1290	3,78		
1320	3,83		

1350	3,88	4,77
1380	3,91	
1410	3,96	
1440	4,01	
1470	4,04	4,86
1500	4,06	
1530	4,09	
1560	4,11	
1590	4,13	
1620	4,17	
1650		4,93
1800	4,25	
1860	4,27	4,99
1980	4,31	
2070		5,07
2100	4,36	
2190		5,12
2280	4,41	
2400	4,44	
2700	4,47	

TABELA A4 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 31 ^o C	TA - 30 ^o C	TA - 29 ^o C
TEMPO (s)	PA - 708 (mmHg)	PA - 710 (mmHg)	PA - 709 (mmHg)
30	0,31	0,63	0,44
60	0,53	0,97	0,99
90	0,78	1,29	1,28
120	0,98	1,50	1,68
150	1,17	1,80	1,91
180	1,40	2,08	2,21
210	1,59	2,33	2,46
240	1,80	2,56	2,68
270	1,95	2,77	2,99
300	2,20	3,00	3,31
330	2,30	3,25	3,55
360	2,49	3,42	3,78
390	2,64	3,57	4,01
420	2,84	3,69	4,16
450	2,97	3,84	4,33
480	3,09	4,00	4,50
510	3,21	4,16	4,67
540	3,29	4,28	4,82
570	3,42	4,41	5,00
600	3,55	4,51	5,18
630	3,65	4,69	5,31
660	3,75	4,83	5,39
690	3,83	4,96	5,45
720	3,94	5,09	5,51
750	4,02	5,20	5,55
780	4,07	5,31	5,60
810	4,16	5,38	
840	4,23	5,43	
870	4,33	5,49	
900	4,41	5,54	
930	4,48	5,58	
960	4,49	5,61	
990	4,55	5,63	
1020	4,60	5,65	
1050	4,64		
1080	4,73		
1110	4,75		
1140	4,80		
1170	4,87		
1200	4,92		
1230	5,01		
1260	5,05		
1290	5,11		
1320	5,17		

1350	5,20
1380	5,22
1500	5,25

TABELA A5 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A – 198,0 (ml/min)	Q _A – 383,0 (ml/min)	Q _A – 522,0 (ml/min)
	T A - 26 ^o C	T A - 27 ^o C	T A - 27 ^o C
TEMPO (s)	PA – 711 (mmHg)	PA – 717 (mmHg)	PA – 712 (mmHg)
30	0,26	0,31	0,53
60	0,40	0,37	1,00
90	0,50	0,69	1,10
120	0,61	0,8	1,36
150	0,80	1,00	1,73
180	1,06	1,30	2,01
210	1,26	1,55	2,33
240	1,47	1,85	2,60
270	1,68	2,12	2,86
300	1,85	2,38	3,15
330	2,03	2,70	3,44
360	2,19	2,88	3,63
390	2,35	3,04	3,80
420	2,51	3,24	3,96
450	2,65	3,42	4,09
480	2,77	3,55	4,20
510	2,90	3,72	4,31
540	3,06	3,85	4,40
570	3,18	3,97	4,48
600	3,25	4,10	4,57
630	3,34	4,17	4,65
660	3,45	4,33	4,73
690	3,53	4,38	4,80
720	3,62	4,44	4,86
750	3,70	4,49	4,92
780	3,78	4,56	4,97
810	3,83	4,60	5,04
840	3,89	4,66	5,09
870	3,94	4,72	5,15
900	3,98	4,78	5,20
930	4,04	4,80	5,25
960	4,09	4,84	5,31
990	4,13	4,87	5,35
1020	4,18	4,88	5,38
1050	4,23	4,90	5,40
1080	4,27	4,92	
1110	4,31	4,95	
1140	4,35	4,99	
1170	4,39	5,01	
1200	4,43	5,03	
1230	4,47		
1260	4,50	5,05	
1320	4,55		

TABELA A6 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	T A - 26 ^o C	T A - 28 ^o C	T A - 26 ^o C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 717 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)
30	0,26	0,26	0,48
60	0,39	0,37	0,82
90	0,49	0,62	1,04
120	0,58	0,91	1,36
150	0,69	1,21	1,66
180	0,80	1,48	2,00
210	0,98	1,78	2,28
240	1,20	2,07	2,56
270	1,41	2,37	2,77
300	1,61	2,61	2,99
330	1,78	2,80	3,14
360	1,95	2,98	3,33
390	2,12	3,15	3,55
420	2,25	3,34	3,75
450	2,42	3,47	3,90
480	2,58	3,63	4,03
510	2,75	3,73	4,14
540	2,87	3,80	4,22
570	2,99	3,87	4,31
600	3,09	3,98	4,39
630	3,19	4,03	4,46
660	3,28	4,12	4,52
690	3,36	4,17	4,57
720	3,44	4,24	4,62
750	3,51	4,30	4,68
780	3,57	4,33	4,75
810	3,64	4,38	4,81
840	3,69	4,44	4,86
870	3,73	4,51	4,91
900	3,78	4,57	4,95
930	3,81	4,63	4,99
960	3,86	4,68	5,03
990	3,90	4,73	5,06
1020	3,94	4,76	5,09
1050	3,99	4,80	5,12
1080	4,04		
1110	4,08		
1140	4,12		
1170	4,16		
1200	4,19		
1230	4,22		
1290	4,23		

TABELA A7 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	T A - 30 ^o C	T A - 29 ^o C	T A - 30 ^o C
TEMPO (s)	PA - 710 (mmHg)	PA - 710 (mmHg)	PA - 709 (mmHg)
30	0,46	0,66	0,61
60	0,80	0,89	0,99
90	1,10	1,50	1,55
120	1,32	2,02	2,09
150	1,68	2,36	2,48
180	1,96	2,65	2,77
210	2,22	2,99	3,04
240	2,57	3,27	3,31
270	2,76	3,51	3,61
300	2,92	3,78	3,88
330	3,04	3,96	4,05
360	3,23	4,14	4,22
390	3,37	4,29	4,40
420	3,60	4,45	4,58
450	3,71	4,63	4,75
480	3,84	4,89	4,98
510	3,90	5,11	5,19
540	4,01	5,18	5,37
570	4,11	5,24	5,47
600	4,22	5,30	5,53
630	4,23	5,36	5,61
660	4,32	5,42	5,65
690	4,43	5,47	5,70
720	4,49		5,74
750	4,55		5,78
780	4,61		5,81
810	4,68		5,84
840	4,73		
870	4,80		
900	4,87		
930	4,93		
960	4,99		
990	5,05		
1020	5,09		
1050	5,10		
1080	5,15		
1110	5,19		
1140	5,22		
1170	5,25		
1200	5,29		
1260	5,35		
1320	5,43		
1440	5,50		
1560	5,56		
1800	5,61		

TABELA A8 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	T A - 26°C	T A - 26°C	T A - 28°C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 717 (mmHg)	PA - 713 (mmHg)
30	0,40	0,49	0,61
60	0,86	0,67	1,30
90	1,27	0,97	1,60
120	1,49	1,29	1,84
150	1,65	1,67	2,09
180	1,85	2,12	2,30
210	2,03	2,33	2,66
240	2,18	2,57	2,94
270	2,29	2,85	3,18
300	2,40	3,08	3,37
330	2,52	3,27	3,55
360	2,61	3,46	3,81
390	2,83	3,64	4,06
420	2,91	3,83	4,29
450	3,06	4,02	4,45
480	3,11	4,16	4,55
510	3,20	4,30	4,63
540	3,30	4,40	4,70
570	3,39	4,45	4,78
600	3,48	4,52	4,84
630	3,58	4,55	4,93
660	3,69	4,58	4,98
690	3,76	4,65	5,03
720	3,85	4,71	5,07
750	3,94	4,76	5,12
780	4,03	4,79	5,15
810	4,09	4,83	5,18
840	4,15	4,87	5,21
870	4,20	4,89	5,24
900	4,27		5,28
930	4,33		5,31
960	4,38		
990	4,41		
1020	4,46		
1050	4,51		
1080	4,55		
1110	4,59		
1230	4,71		
1380	4,82		
1440	4,86		
1680	4,94		
1950	5,02		
2160	5,06		
2370	5,10		

TABELA A9 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos sem a utilização de peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	T A - 25°C	T A - 28°C	T A - 27°C
TEMPO (s)	PA - 711 (mmHg)	PA - 717 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)
30	0,48	0,42	0,50
60	0,51	0,65	0,95
90	0,59	0,91	1,35
120	0,71	1,19	1,66
150	0,90	1,48	1,96
180	1,05	1,87	2,21
210	1,21	2,23	2,51
240	1,40	2,61	2,81
270	1,65	2,91	3,08
300	1,89	3,18	3,30
330	2,13	3,37	3,48
360	2,32	3,52	3,66
390	2,53	3,66	3,86
420	2,71	3,79	4,08
450	2,82	3,95	4,21
480	2,95	4,05	4,29
510	3,06	4,14	4,37
540	3,17	4,18	4,43
570	3,26	4,24	4,49
600	3,35	4,31	4,57
630	3,45	4,36	4,62
660	3,54	4,41	4,68
690	3,62		4,72
720	3,68		4,76
750	3,75		4,79
780	3,83		4,82
810	3,88		
840	3,92		
870	3,96		
900	4,00		
930	4,04		
960	4,07		
990	4,10		
1020	4,13		
1050	4,16		
1080	4,19		
1110	4,21		
1140	4,23		
1170	4,26		
1200	4,29		
1260	4,34		
1320	4,38		
1380	4,43		
1470	4,47		

1560	4,50
1770	4,56
2070	4,73
2310	4,79
2460	4,84

TABELA A10 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	T A - 28 ^o C	T A - 30 ^o C	T A - 29 ^o C
TEMPO (s)	PA - 716 (mmHg)	PA - 714 (mmHg)	PA - 714 (mmHg)
30	0,26	0,35	0,29
60	0,33	0,69	0,78
90	0,58	1,06	1,33
120	0,74	1,19	1,74
150	0,89	1,88	2,18
180	1,13	2,13	2,60
210	1,31	2,41	3,04
240	1,60	2,69	3,46
270	1,75	2,88	3,73
300	1,85	3,19	4,00
330	2,08	3,42	4,30
360	2,24	3,61	4,48
390	2,46	3,90	4,77
420	2,60	4,01	5,04
450	2,71	4,30	5,15
480	2,96	4,38	5,44
510	3,13	4,57	5,47
540	3,29	4,65	5,52
570	3,38	4,87	5,71
600	3,58	5,02	5,82
630	3,77	5,11	5,99
660	3,88	5,17	6,15
690	4,03	5,35	
720	4,20	5,46	
750	4,28	5,58	
780	4,41	5,63	
810	4,57	5,70	
840	4,64	5,79	
870	4,70	5,86	
900	4,75	5,87	
930	4,86	5,93	
960	4,95	6,07	
990	5,05	6,09	
1020	5,12	6,13	
1050	5,20	6,20	
1080	5,27	6,28	
1110	5,31	6,31	
1140	5,37		
1170	5,43		
1200	5,51		
1230	5,56		
1260	5,60		
1470	5,91		
1800	6,18		
2130	6,33		

TABELA A11 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	T A - 27 ^o C	T A - 30 ^o C	T A - 27 ^o C
TEMPO (s)	PA - 716 (mmHg)	PA - 714 (mmHg)	PA - 714 (mmHg)
30	0,22	0,37	0,38
60	0,39	0,58	0,71
90	0,61	0,91	1,11
120	0,75	1,26	1,54
150	0,95	1,55	1,98
180	1,13	1,90	2,39
210	1,33	2,20	2,68
240	1,53	2,52	3,10
270	1,68	2,67	3,22
300	1,84	2,96	3,58
330	2,05	3,20	3,75
360	2,31	3,42	3,99
390	2,49	3,72	4,18
420	2,60	3,85	4,44
450	2,75	4,02	4,49
480	2,90	4,17	4,63
510	3,15	4,30	4,81
540	3,16	4,42	4,87
570	3,26	4,54	4,92
600	3,34	4,65	5,02
630	3,50	4,73	5,13
660	3,54	4,83	5,22
690	3,62	4,92	5,28
720	3,69	4,98	
750	3,81	5,02	
780	3,90	5,06	
810	4,00	5,10	
840	4,06	5,13	
870	4,11	5,15	
900	4,18	5,18	
930	4,21	5,21	
960	4,27	5,26	
990	4,33	5,27	
1020	4,41	5,29	
1050	4,47	5,33	
1080	4,53	5,35	
1110	4,59		
1140	4,65		
1170	4,69		

TABELA A12 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A – 198,0 (ml/min)	Q _A – 383,0 (ml/min)	Q _A – 522,0 (ml/min)
	T A – 30 ^o C	T A – 29 ^o C	T A – 28 ^o C
TEMPO (s)	PA – 712 (mmHg)	PA – 714 (mmHg)	PA – 714 (mmHg)
30	0,23	0,22	0,35
60	0,43	0,56	0,64
90	0,60	0,77	0,99
120	0,70	1,15	1,42
150	0,89	1,56	1,98
180	1,01	1,91	2,37
210	1,17	2,30	2,53
240	1,32	2,51	2,86
270	1,37	2,78	3,00
300	1,53	2,96	3,39
330	1,73	3,17	3,61
360	2,00	3,36	3,82
390	2,12	3,55	3,99
420	2,27	3,72	4,12
450	2,42	3,87	4,22
480	2,66	3,99	4,33
510	2,75	4,11	4,42
540	2,90	4,18	4,51
570	2,99	4,35	4,60
600	3,11	4,40	4,68
630	3,22	4,51	4,75
660	3,35	4,58	4,82
690	3,41	4,64	4,87
720	3,49	4,68	4,92
750	3,58	4,72	4,95
780	3,67	4,77	4,98
810	3,74	4,80	5,00
840	3,82		
870	3,88		
900	3,96		
930	4,02		
960	4,08		
990	4,14		
1020	4,19		
1050	4,23		
1080	4,27		
1110	4,31		
1140	4,35		
1170	4,40		
1200	4,43		
1230	4,47		

TABELA A13 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	T A - 25 ^o C	T A - 28 ^o C	T A - 30 ^o C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)	PA - 714 (mmHg)
30	0,41	0,66	0,55
60	0,67	1,35	1,49
90	0,85	1,98	2,25
120	1,07	2,47	2,80
150	1,24	2,85	3,24
180	1,52	3,34	3,49
210	1,72	3,58	3,89
240	2,05	3,86	4,28
270	2,25	4,07	4,65
300	2,42	4,23	4,94
330	2,54	4,48	5,12
360	2,68	4,75	5,31
390	2,82	5,03	5,47
420	3,15	5,20	5,60
450	3,30	5,40	5,72
480	3,45	5,58	5,81
510	3,55	5,78	5,90
540	3,63	5,91	5,98
570	3,72	6,05	6,05
600	3,87	6,14	6,10
630	3,98	6,27	
660	4,14	6,45	
690	4,20	6,57	
720	4,35	6,61	
750	4,53	6,67	
780	4,72	6,77	
810	4,83	6,81	
840	4,91	6,94	
870	5,02	6,97	
900	5,11	7,01	
930	5,23	7,08	
960	5,31	7,17	
990	5,39	7,21	
1020	5,44	7,26	
1050	5,50	7,30	
1080	5,54		
1110	5,59		

TABELA A14 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.

COCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	T A - 26°C	T A - 28°C	T A - 30°C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)	PA - 714 (mmHg)
30	0,33	0,67	0,51
60	0,52	1,10	1,32
90	0,81	1,38	1,72
120	0,99	1,64	2,37
150	1,18	2,15	2,84
180	1,51	2,61	3,13
210	1,70	3,04	3,45
240	1,89	3,32	3,73
270	2,03	3,52	4,04
300	2,19	3,83	4,31
330	2,36	4,06	4,52
360	2,54	4,25	4,70
390	2,66	4,34	4,88
420	2,81	4,54	5,00
450	2,94	4,63	5,13
480	3,08	4,78	5,21
510	3,29	4,90	5,26
540	3,38	5,03	5,34
570	3,50	5,12	5,42
600	3,65	5,18	5,48
630	3,75	5,26	5,61
660	3,86	5,33	
690	3,97	5,39	
720	4,05	5,45	
750	4,13	5,52	
780	4,19	5,58	
810	4,25	5,65	
840	4,31	5,68	
870	4,37	5,71	
900	4,43		
930	4,50		
960	4,55		
990	4,59		

TABELA A15 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 30 ^o C	TA - 29 ^o C	TA - 30 ^o C
TEMPO (s)	PA - 711 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)
30	0,29	0,43	0,30
60	0,49	0,85	0,84
90	0,77	1,25	1,30
120	0,91	1,79	1,87
150	1,07	2,18	2,23
180	1,27	2,56	2,62
210	1,43	2,86	3,02
240	1,59	3,18	3,37
270	1,77	3,57	3,78
300	1,95	3,65	4,12
330	2,09	3,82	4,31
360	2,23	4,13	4,47
390	2,37	4,21	4,60
420	2,51	4,34	4,72
450	2,65	4,46	4,82
480	2,80	4,57	4,91
510	2,95	4,66	5,00
540	3,13	4,75	
570	3,29	4,84	
600	3,44	4,89	
630	3,57		
660	3,65		
690	3,77		
720	3,85		
750	3,92		
780	4,00		
810	4,08		
840	4,15		
870	4,21		
900	4,27		
930	4,35		
960	4,42		
990	4,48		

TABELA A16 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 ml/min	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	T A - 28 ^o C	T A - 26 ^o C	T A - 25 ^o C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 716 (mmHg)	PA - 714 (mmHg)
30	0,62	0,76	0,59
60	1,03	1,66	1,58
90	1,76	2,17	2,37
120	1,92	2,76	3,30
150	2,52	3,17	3,61
180	2,72	3,55	3,88
210	2,87	4,01	4,36
240	3,02	4,37	4,80
270	3,34	4,68	5,22
300	3,71	4,85	5,54
330	3,86	5,08	5,85
360	4,00	5,25	5,98
390	4,09	5,41	6,26
420	4,23	5,69	6,31
450	4,32	5,87	6,43
480	4,45	6,09	6,59
510	4,58	6,21	6,67
540	4,74	6,29	6,72
570	4,90	6,44	6,76
600	5,02	6,59	6,81
630	5,26	6,68	
660	5,36	6,82	
690	5,43		
720	5,50		
750	5,57		
780	5,59		
810	5,67		
840	5,75		
870	5,82		
900	5,86		
930	5,91		
960	5,94		
990	5,97		

TABELA A17 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	T. A. - 29 ^o C	T. A. - 27 ^o C	T. A. - 26 ^o C
TEMPO (s)	P.A. - 712 (mmHg)	P.A. - 716 (mmHg)	P.A. - 714 (mmHg)
30	0,52	0,85	0,66
60	0,88	1,12	1,51
90	1,25	1,44	2,10
120	1,45	1,85	2,63
150	1,63	2,25	3,22
180	1,89	2,61	3,68
210	2,09	2,99	4,08
240	2,29	3,35	4,42
270	2,51	3,79	4,70
300	2,67	4,03	4,96
330	2,89	4,25	5,15
360	3,04	4,44	5,37
390	3,17	4,59	5,48
420	3,39	4,72	5,57
450	3,48	4,88	5,63
480	3,67	5,01	5,69
510	3,91	5,15	5,76
540	4,01	5,28	5,82
570	4,11	5,39	5,89
600	4,19	5,47	5,98
630	4,25	5,58	
660	4,33	5,69	
690	4,40	5,78	
720	4,46	5,88	
750	4,51		

TABELA A18 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 1 peça cisalhante, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A -383,0 (ml/min)	Q _A -522,0 (ml/min)
	T A - 29 ^o C	TA - 29 ^o C	TA - 28 ^o C
TEMPO (s)	PA - 711 (mmHg)	PA - 716 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)
30	0,41	0,61	0,56
60	0,61	0,87	1,08
90	0,90	1,20	1,69
120	1,15	1,57	2,35
150	1,33	1,92	2,87
180	1,59	2,32	3,43
210	1,83	2,67	4,02
240	2,12	3,14	4,26
270	2,39	3,38	4,51
300	2,61	3,70	4,65
330	2,80	4,03	4,81
360	3,04	4,32	4,99
390	3,18	4,49	5,09
420	3,31	4,63	5,21
450	3,44	4,73	
480	3,58	4,83	
510	3,69	4,92	
540	3,81		
570	3,96		
600	4,05		
630	4,19		
660	4,28		
690	4,37		
720	4,41		
750	4,46		
780	4,51		
810	4,56		
840	4,59		
870	4,62		
900	4,65		
930	4,68		
960	4,70		
990	4,73		
1020	4,75		
1050	4,76		

TABELA A19 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	T A - 30 ^o C	T A - 29 ^o C	T A - 29 ^o C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 711 (mmHg)	PA - 714 (mmHg)
30	0,30	0,37	0,45
60	0,79	1,17	1,11
90	1,17	1,82	1,81
120	1,38	2,48	2,40
150	1,70	2,86	3,01
180	2,02	3,31	3,38
210	2,17	3,70	3,65
240	2,28	4,00	3,99
270	2,51	4,38	4,47
300	2,62	4,67	4,89
330	2,73	4,83	5,18
360	2,87	5,08	5,49
390	3,11	5,17	5,86
420	3,18	5,41	6,12
450	3,35	5,62	6,33
480	3,59	5,79	6,45
510	3,76	5,92	6,61
540	3,87	6,03	6,76
570	4,21	6,25	6,91
600	4,32	6,35	7,09
630	4,38	6,41	7,21
660	4,46	6,44	7,29
690	4,52	6,57	7,34
720	4,62	6,61	
750	4,72	6,67	
780	4,87		
810	5,00		
840	5,11		
870	5,29		
900	5,33		
930	5,36		
960	5,43		
990	5,53		
1020	5,61		
1050	5,71		
1080	5,78		
1110	5,79		
1140	5,88		
1170	5,93		
1200	6,00		
1230	6,02		
1260	6,06		
1380	6,23		
1620	6,51		

TABELA A20 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 30°C	TA - 29°C	TA - 30°C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 714 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)
30	0,28	0,32	0,49
60	0,47	0,79	1,21
90	0,88	1,37	1,81
120	1,07	1,66	2,30
150	1,36	2,00	2,89
180	1,59	2,51	3,17
210	1,85	2,98	3,49
240	2,02	3,29	3,75
270	2,29	3,55	3,96
300	2,44	3,78	4,18
330	2,58	4,05	4,44
360	2,72	4,28	4,78
390	2,87	4,42	5,06
420	3,01	4,62	5,20
450	3,17	4,85	5,33
480	3,30	5,10	5,42
510	3,46	5,22	5,52
540	3,61	5,36	5,61
570	3,71	5,44	5,70
600	3,82	5,51	5,79
630	3,95	5,59	5,86
660	4,05		5,92
690	4,14		5,97
720	4,21		6,01
750	4,28		6,05
780	4,35		
810	4,41		
840	4,48		
870	4,56		
900	4,61		
930	4,65		
960	4,70		
990	4,75		
1020	4,79		
1050	4,82		
1080	4,84		

TABELA A21 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	T A - 26 ^o C	T A - 30 ^o C	T A - 31 ^o C
TEMPO (s)	PA - 713 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)
30	0,25	0,30	0,32
60	0,43	0,86	0,82
90	0,69	1,23	1,41
120	0,81	1,49	1,81
150	0,96	1,85	2,28
180	1,14	2,23	2,69
210	1,30	2,59	3,05
240	1,47	2,97	3,34
270	1,66	3,25	3,63
300	1,88	3,68	3,96
330	2,09	3,89	4,18
360	2,29	4,14	4,40
390	2,46	4,31	4,59
420	2,72	4,44	4,76
450	2,90	4,55	4,92
480	3,08	4,65	5,06
510	3,20		5,18
540	3,31		5,30
570	3,40		5,39
600	3,49		5,47
630	3,57		5,56
660	3,71		5,62
690	3,82		5,68
720	3,88		
750	3,93		
780	4,02		
810	4,09		
840	4,14		
870	4,19		
900	4,26		
930	4,33		
960	4,40		
990	4,46		
1020	4,51		
1050	4,55		
1080	4,60		
1110	4,64		
1140	4,66		
1170	4,68		
1200	4,71		

TABELA A22 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A – 198,0 (ml/min)	Q _A – 383,0 (ml/min)	Q _A – 522,0 (ml/min)
	TA - 29 ^o C	T A - 29 ^o C	T A - 29 ^o C
TEMPO (s)	PA – 712 (mmHg)	PA – 714 (mmHg)	PA – 714 (mmHg)
30	0,51	0,97	0,89
60	0,99	1,37	1,83
90	1,43	2,54	2,71
120	1,72	3,06	3,35
150	2,05	3,48	3,76
180	2,35	4,07	4,29
210	2,67	4,45	4,62
240	3,08	4,83	4,98
270	3,33	5,04	5,31
300	3,52	5,29	5,61
330	3,79	5,54	5,94
360	3,92	5,81	6,18
390	4,04	5,99	6,32
420	4,19	6,14	6,44
450	4,33	6,30	6,56
480	4,57		6,64
510	4,73		
540	4,86		
570	4,95		
600	5,07		
630	5,29		
660	5,42		
690	5,49		
720	5,55		
750	5,64		
780	5,72		
810	5,78		
840	5,83		
870	5,89		
900	6,01		
930	6,05		

TABELA A23 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 25°C	TA - 30°C	TA - 27°C
TEMPO (s)	PA - 714 (mmHg)	PA - 714 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)
30	0,55	0,69	0,72
60	1,06	1,23	1,47
90	1,20	1,63	1,99
120	1,40	2,09	2,68
150	1,76	2,41	3,14
180	2,09	2,97	3,58
210	2,21	3,51	3,94
240	2,39	3,85	4,28
270	2,79	4,22	4,47
300	3,00	4,48	4,65
330	3,22	4,73	4,85
360	3,45	4,98	5,02
390	3,69	5,04	5,21
420	3,79	5,19	5,37
450	4,13	5,37	5,51
480	4,31	5,48	5,65
510	4,52	5,59	5,72
540	4,62		5,83
570	4,66		5,91
600	4,76		
630	4,81		
660	4,95		
690	5,13		
720	5,18		
750	5,22		

TABELA A24 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	T A - 29°C	T A - 29°C	T A - 31°C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 714 (mmHg)	PA - 714 (mmHg)
30	0,35	0,62	0,63
60	0,55	1,08	1,04
90	0,87	1,88	1,61
120	1,20	2,47	2,08
150	1,49	2,84	2,61
180	1,78	3,18	3,18
210	2,05	3,51	3,66
240	2,39	3,78	4,08
270	2,63	4,10	4,33
300	2,85	4,29	4,54
330	3,06	4,45	4,70
360	3,24	4,51	4,83
390	3,42	4,63	4,92
420	3,59		5,04
450	3,75		5,13
480	3,88		5,20
510	3,99		5,29
540	4,11		5,35
570	4,20		5,46
600	4,31		5,50
630	4,43		
660	4,54		
690	4,63		
720	4,71		
750	4,79		

TABELA A25 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	T A - 30 ^o C	TA - 27 ^o C	TA - 30 ^o C
TEMPO (s)	PA – 711 (mmHg)	PA – 714 (mmHg)	PA – 714 (mmHg)
30	0,94	1,08	1,15
60	1,71	2,26	2,35
90	2,29	3,14	3,08
120	2,64	3,79	3,89
150	3,00	4,31	4,18
180	3,30	4,66	4,57
210	3,66	5,04	5,10
240	3,78	5,37	5,68
270	3,92	5,62	5,97
300	4,15	6,08	6,24
330	4,27	6,29	6,42
360	4,48	6,48	6,63
390	4,66	6,63	6,81
420	4,80	6,77	6,96
450	4,93	6,91	7,08
480	5,04	7,00	7,19
510	5,15	7,11	
540	5,29	7,22	
570	5,39	7,37	
600	5,48	7,44	
630	5,57	7,50	
660	5,66	7,56	
690	5,76	7,61	
720	5,83	7,65	
750	5,91	7,68	
780	5,98		
810	6,08		
840	6,14		
870	6,20		
900	6,29		
930	6,38		
960	6,43		
990	6,47		
1020	6,51		
1050	6,55		
1080	6,59		

TABELA A26 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 30°C	TA - 27°C	TA - 29°C
TEMPO (s)	PA - 713 (mmHg)	PA - 714 (mmHg)	PA - 713 (mmHg)
30	0,89	0,98	0,99
60	1,14	1,61	1,62
90	1,51	2,31	2,29
120	1,87	2,96	3,17
150	2,05	3,52	3,86
180	2,37	3,88	4,22
210	2,70	4,28	4,56
240	3,00	4,75	4,88
270	3,29	5,11	5,23
300	3,55	5,30	5,41
330	3,76	5,49	5,60
360	3,98	5,65	5,75
390	4,19	5,79	5,91
420	4,31	5,94	6,07
450	4,42	6,04	6,21
480	4,52	6,13	
510	4,63	6,21	
540	4,71	6,29	
570	4,79	6,35	
600	4,88	6,40	
630	5,02	6,44	
660	5,19		
690	5,26		

TABELA A27 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 2 peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 28 ^o C	TA - 30 ^o C	TA - 28 ^o C
TEMPO (s)	PA - 710 (mmHg)	PA - 714 (mmHg)	PA - 713 (mmHg)
30	0,55	1,01	0,67
60	0,89	1,57	1,07
90	1,08	2,19	1,93
120	1,55	2,79	2,74
150	1,98	3,30	3,49
180	2,35	3,81	3,89
210	2,69	4,18	4,25
240	2,92	4,45	4,58
270	3,21	4,68	4,82
300	3,42	4,87	5,02
330	3,62	5,04	5,21
360	3,80	5,18	5,37
390	3,99	5,30	5,52
420	4,11	5,41	5,64
450	4,22	5,52	
480	4,33	5,63	
510	4,47	5,70	
540	4,52		
570	4,60		
600	4,66		
630	4,71		
660	4,77		
690	4,83		
720	4,87		
750	4,90		
780	4,93		
810	4,95		

TABELA A28 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 30 ^o C	TA - 29 ^o C	TA - 30 ^o C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)	PA - 711 (mmHg)
30	0,44	0,39	0,42
60	0,74	1,20	1,38
90	1,21	1,89	2,09
120	1,48	2,52	2,66
150	1,74	2,91	3,23
180	2,15	3,39	3,58
210	2,26	3,89	3,99
240	2,41	4,16	4,39
270	2,64	4,50	4,85
300	2,85	4,83	5,11
330	2,99	5,01	5,43
360	3,18	5,22	5,73
390	3,34	5,41	6,08
420	3,47	5,67	6,44
450	3,59	5,86	6,67
480	3,78	5,96	6,75
510	3,92	6,05	7,00
540	4,13	6,24	7,14
570	4,41	6,39	7,28
600	4,45	6,51	7,42
630	4,55	6,55	7,58
660	4,69	6,60	7,66
690	4,80	6,76	7,74
720	4,93	6,82	7,83
750	5,05	6,91	7,91
780	5,15	7,00	7,99
810	5,37		8,08
840	5,46		8,15
870	5,51		
900	5,56		
930	5,62		
960	5,73		
990	5,78		
1020	5,89		
1050	5,94		
1080	5,99		
1110	6,07		
1140	6,11		
1170	6,13		
1200	6,15		

TABELA A29 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 25 ^o C	TA - 30 ^o C	TA - 29 ^o C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 713 (mmHg)	PA - 711 (mmHg)
30	0,32	0,38	0,43
60	0,52	0,95	1,33
90	0,93	1,79	1,93
120	1,15	2,38	2,54
150	1,44	2,72	3,00
180	1,74	3,10	3,35
210	1,97	3,42	3,74
240	2,23	3,81	4,10
270	2,45	4,11	4,35
300	2,63	4,36	4,59
330	2,85	4,57	4,80
360	3,00	4,76	5,06
390	3,14	5,92	5,26
420	3,26	5,18	5,51
450	3,40	5,34	5,78
480	3,56	5,49	5,97
510	3,67	5,61	6,17
540	3,79	5,71	6,31
570	3,89	5,82	6,44
600	4,01		6,54
630	4,21		6,61
660	4,35		6,69
690	4,48		6,76
720	4,58		6,82
750	4,72		6,87
780	4,76		6,90
810	4,81		
840	4,87		
870	4,92		
900	5,01		
930	5,03		
960	5,07		
990	5,10		

TABELA A30 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 30°C	TA - 27°C	TA - 28°C
TEMPO (s)	PA - 714 (mmHg)	PA - 713 (mmHg)	PA - 711 (mmHg)
30	0,29	0,31	0,41
60	0,55	0,84	0,99
90	0,74	1,65	1,62
120	0,98	2,18	2,05
150	1,19	2,54	2,62
180	1,40	3,01	3,10
210	1,65	3,31	3,47
240	1,89	3,54	3,90
270	2,09	3,86	4,28
300	2,26	4,11	4,60
330	2,42	4,37	4,95
360	2,57	4,57	5,19
390	2,72	4,74	5,40
420	2,91	4,89	5,61
450	3,08	5,00	5,76
480	3,22		5,92
510	3,39		6,07
540	3,57		6,14
570	3,72		6,20
600	3,98		6,25
630	4,11		6,30
660	4,18		6,35
690	4,26		
720	4,36		
750	4,42		
780	4,51		
810	4,60		
840	4,67		
870	4,72		
900	4,78		
930	4,82		
960	4,85		
990	4,87		
1020	4,90		

TABELA A31 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 29°C	TA - 27°C	TA - 28°C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)	PA - 711 (mmHg)
30	0,54	0,92	1,13
60	1,27	1,34	2,04
90	1,79	2,54	2,80
120	2,02	3,21	3,44
150	2,43	3,69	3,97
180	2,66	4,25	4,44
210	3,07	4,61	4,77
240	3,59	4,96	5,22
270	3,78	5,15	5,59
300	3,91	5,33	5,95
330	4,16	5,64	6,22
360	4,27	5,89	6,47
390	4,49	6,03	6,64
420	4,60	6,19	6,83
450	4,80	6,35	7,01
480	4,96	6,48	
510	5,14		
540	5,33		
570	5,41		
600	5,62		
630	5,70		
660	5,82		
690	5,91		
720	6,05		
750	6,19		
780	6,25		
810	6,34		
840	6,44		
870	6,49		
900	6,57		
930	6,68		
960	6,75		
990	6,77		

TABELA A32 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 29 ^o C	TA - 28 ^o C	TA - 28 ^o C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 713 (mmHg)	PA - 713 (mmHg)
30	0,59	0,72	0,81
60	1,09	1,58	1,63
90	1,33	2,11	2,28
120	1,60	2,57	2,97
150	1,97	2,91	3,49
180	2,31	3,57	3,88
210	2,52	3,94	4,21
240	2,77	4,35	4,54
270	3,01	4,65	4,89
300	3,34	4,93	5,15
330	3,57	5,21	5,35
360	3,83	5,49	5,59
390	3,99	5,75	5,78
420	4,27	5,88	6,03
450	4,45	5,96	6,15
480	4,63	6,03	6,37
510	4,71		6,54
540	4,78		6,64
570	4,89		
600	5,07		
630	5,15		
660	5,29		
690	5,41		
720	5,54		
750	5,59		
780	5,61		
810	5,73		
840	5,80		
870	5,83		
900	5,87		

TABELA A33 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 27 ^o C	TA - 27 ^o C	TA - 29 ^o C
TEMPO (s)	PA - 711 (mmHg)	PA - 714 (mmHg)	PA - 711 (mmHg)
30	0,40	0,51	0,61
60	0,70	1,25	1,22
90	0,93	1,95	1,81
120	1,21	2,39	2,35
150	1,51	3,05	2,92
180	1,97	3,41	3,58
210	2,14	3,79	4,05
240	2,42	4,18	4,35
270	2,71	4,59	4,72
300	2,98	4,88	5,08
330	3,25	5,05	5,24
360	3,59	5,25	5,41
390	3,82	5,43	5,65
420	4,06	5,58	5,82
450	4,32		5,99
480	4,47		6,16
510	4,59		6,29
540	4,70		
570	4,80		
600	4,89		
630	4,98		
660	5,06		
690	5,11		

TABELA A34 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 28 ^o C	TA - 30 ^o C	TA - 28 ^o C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)
30	0,91	1,20	1,49
60	1,61	2,54	2,55
90	2,13	3,38	3,28
120	2,80	3,89	3,87
150	3,28	4,38	4,41
180	3,56	4,78	4,93
210	3,74	5,17	5,45
240	4,07	5,40	5,88
270	4,35	5,76	6,16
300	4,59	6,11	6,48
330	4,70	6,52	6,67
360	4,88	6,66	6,90
390	5,05	6,74	7,09
420	5,21	6,86	7,28
450	5,35	7,02	7,45
480	5,41	7,15	7,63
510	5,52	7,34	7,73
540	5,67	7,40	
570	5,75	7,58	
600	5,86		
630	6,00		
660	6,17		
690	6,25		
720	6,32		
750	6,38		
780	6,41		

TABELA A35 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 30 ^o C	TA - 30 ^o C	TA - 27 ^o C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 713 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)
30	0,81	1,03	1,19
60	1,07	1,97	1,99
90	1,54	2,58	2,69
120	1,90	3,12	3,47
150	2,23	3,68	4,05
180	2,54	4,29	4,49
210	2,79	4,56	4,76
240	3,06	4,83	5,03
270	3,49	5,11	5,30
300	3,77	5,27	5,55
330	4,04	5,42	5,78
360	4,35	5,65	5,94
390	4,50	5,88	6,11
420	4,62	6,02	6,24
450	4,72	6,15	6,38
480	4,77	6,24	6,45
510	4,85	6,31	
540	4,98		
570	5,09		
600	5,19		
630	5,27		
660	5,35		
690	5,41		
720	5,46		
750	5,52		
780	5,60		
810	5,68		
840	5,74		
870	5,81		
900	5,86		

TABELA A36 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 29 ^o C	TA - 28 ^o C	TA - 26 ^o C
TEMPO (s)	PA - 714 (mmHg)	PA - 717 (mmHg)	PA - 714 (mmHg)
30	0,51	0,98	0,92
60	0,92	1,77	1,30
90	1,24	2,36	2,31
120	1,58	2,97	3,02
150	2,01	3,59	3,65
180	2,56	4,02	4,18
210	2,82	4,33	4,58
240	3,23	4,57	4,83
270	3,35	4,76	5,18
300	3,54	4,94	5,41
330	3,77	5,12	5,61
360	4,02	5,31	5,80
390	4,18	5,45	5,95
420	4,40	5,59	6,08
450	4,55	5,70	
480	4,69	5,79	
510	4,82	5,87	
540	4,89		
570	4,96		
600	5,02		
630	5,07		
660	5,12		
690	5,17		
720	5,20		
750	5,22		

TABELA A37 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A – 198,0 (ml/min)	Q _A – 383,0 (ml/min)	Q _A – 522,0 (ml/min)
	TA - 30°C	TA - 28°C	TA - 28°C
TEMPO (s)	PA – 710 (mmHg)	PA – 710 (mmHg)	PA – 714 (mmHg)
30	0,35	0,38	0,40
60	0,75	1,10	1,11
90	1,02	1,47	1,70
120	1,27	2,17	2,21
150	1,50	2,52	2,50
180	1,73	2,81	3,22
210	1,89	3,09	3,55
240	2,06	3,40	3,87
270	2,25	3,67	4,00
300	2,45	4,02	4,13
330	2,59	4,29	4,56
360	2,71	4,60	4,83
390	2,92	4,80	5,00
420	3,03	4,96	5,21
450	3,16	5,11	5,50
480	3,26	5,25	5,68
510	3,38	5,38	5,82
540	3,51	5,55	5,90
570	3,63	5,66	6,05
600	3,75	5,89	6,18
630	3,85	6,00	6,26
660	4,08	6,05	6,35
690	4,23	6,12	6,44
720	4,31	6,21	6,50
750	4,49	6,27	
780	4,53		
810	4,61		
840	4,87		
870	4,92		
900	5,02		
930	5,11		
960	5,21		
990	5,28		
1020	5,34		
1050	5,41		
1080	5,49		
1110	5,55		
1140	5,61		
1170	5,64		
1200	5,67		

TABELA A38 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 28 ^o C	TA - 28 ^o C	TA - 28 ^o C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 711 (mmHg)	PA - 716 (mmHg)
30	0,29	0,35	0,26
60	0,45	0,57	0,73
90	0,67	1,02	1,18
120	0,88	1,32	1,85
150	1,15	1,69	2,14
180	1,39	1,99	2,51
210	1,62	2,47	2,88
240	1,85	2,81	3,30
270	2,01	3,09	3,59
300	2,20	3,30	3,73
330	2,37	3,51	3,93
360	2,54	3,70	4,10
390	2,69	3,98	4,32
420	2,81	4,15	4,46
450	2,90	4,29	4,60
480	3,01	4,43	4,76
510	3,12	4,57	4,87
540	3,25	4,68	5,02
570	3,39		5,23
600	3,48		5,48
630	3,57		5,58
660	3,62		5,61
690	3,73		5,73
720	3,86		5,80
750	3,98		5,87
780	4,05		5,89
810	4,11		5,90
840	4,15		5,93
870	4,19		
900	4,26		
930	4,35		
960	4,41		
990	4,44		
1020	4,51		
1050	4,55		
1080	4,59		
1110	4,63		
1140	4,68		

TABELA A39 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 200 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A – 198,0 (ml/min)	Q _A – 383,0 (ml/min)	Q _A – 522,0 (ml/min)
	TA - 26 ^o C	TA - 26 ^o C	TA - 27 ^o C
TEMPO (s)	PA – 714 (mmHg)	PA – 716 (mmHg)	PA – 714 (mmHg)
30	0,26	0,30	0,35
60	0,42	0,72	0,73
90	0,67	1,11	1,17
120	0,77	1,39	1,58
150	0,98	1,61	1,91
180	1,13	1,97	2,19
210	1,33	2,29	2,54
240	1,51	2,63	2,79
270	1,68	2,99	3,18
300	1,91	3,35	3,48
330	2,12	3,60	3,75
360	2,32	3,81	3,99
390	2,45	3,90	4,17
420	2,59	4,02	4,29
450	2,76	4,11	4,39
480	2,90	4,27	4,47
510	2,98	4,36	
540	3,09	4,44	
570	3,21	4,49	
600	3,29	4,53	
630	3,37		
660	3,48		
690	3,59		
720	3,65		
750	3,70		
780	3,76		
810	3,80		
840	3,89		
870	4,02		
900	4,08		
930	4,15		
960	4,18		
990	4,21		
1020	4,23		
1050	4,26		
1080	4,28		
1110	4,31		
1140	4,33		
1170	4,35		
1200	4,36		

TABELA A40 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 29°C	TA - 29°C	TA - 30°C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)
30	0,47	0,83	0,85
60	0,86	1,38	1,62
90	1,20	2,00	2,20
120	1,63	2,60	2,97
150	1,84	3,10	3,35
180	2,05	3,57	3,75
210	2,33	3,89	4,12
240	3,65	4,25	4,59
270	2,78	4,56	4,83
300	3,08	4,85	5,11
330	3,23	5,14	5,40
360	3,51	5,37	5,55
390	3,68	5,52	5,71
420	3,82	5,78	5,82
450	3,97	5,95	5,90
480	4,20	6,11	
510	4,25		
540	4,31		
570	4,40		
600	4,50		
630	4,52		
660	4,65		
690	4,93		
720	5,01		
750	5,12		
780	5,28		
810	5,37		
840	5,49		
870	5,54		
900	5,61		
930	5,63		

TABELA A41– Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 27°C	TA - 28°C	TA - 28°C
TEMPO (s)	PA - 714 (mmHg)	PA - 711 (mmHg)	PA - 716 (mmHg)
30	0,56	0,68	0,61
60	0,89	1,17	1,39
90	1,09	1,60	1,79
120	1,20	2,02	2,21
150	1,38	2,43	2,65
180	1,62	2,84	3,13
210	1,92	3,25	3,44
240	2,10	3,62	3,79
270	2,35	3,91	4,10
300	2,61	4,19	4,37
330	2,89	4,41	4,56
360	3,02	4,62	4,77
390	3,17	4,79	4,94
420	3,32	4,93	5,09
450	3,57		5,21
480	3,78		5,32
510	3,97		5,41
540	4,09		5,50
570	4,21		5,59
600	4,33		5,67
630	4,45		5,74
660	4,51		5,81
690	4,70		
720	4,81		
750	4,90		
780	4,95		
810	5,00		
840	5,02		
870	5,11		
900	5,17		
930	5,18		
960	5,20		
990	5,22		
1020	5,27		

TABELA A42 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 300 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 28°C	TA - 29°C	TA - 29°C
TEMPO (s)	PA - 716 (mmHg)	PA - 711 (mmHg)	PA - 716 (mmHg)
30	0,33	0,53	0,58
60	0,54	0,99	1,17
90	0,78	1,44	1,65
120	0,99	1,92	2,02
150	1,17	2,39	2,47
180	1,39	2,87	2,93
210	1,63	3,17	3,31
240	1,87	3,50	3,69
270	2,08	3,78	3,97
300	2,29	4,01	4,24
330	2,54	4,17	4,51
360	2,77	4,29	4,68
390	2,97	4,51	4,82
420	3,20		
450	3,42		
480	3,60		
510	3,85		
540	3,99		
570	4,08		
600	4,16		
630	4,24		
660	4,33		
690	4,44		
720	4,50		

TABELA A43 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 20°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 30°C	TA - 29°C	TA - 29°C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 714 (mmHg)	PA - 710 (mmHg)
30	0,71	1,06	0,89
60	1,20	1,76	1,85
90	1,89	2,35	2,63
120	2,44	2,99	3,49
150	2,74	3,50	3,87
180	2,98	3,87	4,20
210	3,30	4,19	4,63
240	3,67	4,59	4,99
270	3,82	4,98	5,35
300	4,00	5,19	5,70
330	4,13	5,33	5,97
360	4,23	5,49	6,18
390	4,35	5,73	
420	4,49	5,92	
450	4,62	6,08	
480	4,84	6,17	
510	4,95	6,39	
540	5,01		
570	5,19		
600	5,25		
630	5,38		
660	5,47		
690	5,51		
720	5,64		
750	5,69		
780	5,77		
810	5,86		
840	5,98		
870	6,00		

TABELA A44 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 27 ^o C	TA - 27,5 ^o C	TA - 28 ^o C
TEMPO (s)	PA - 712 (mmHg)	PA - 712 (mmHg)	PA - 716 (mmHg)
30	0,65	0,97	0,87
60	0,97	1,39	1,35
90	1,42	1,85	2,05
120	1,65	2,27	2,85
150	1,90	2,63	3,29
180	2,12	3,12	3,85
210	2,34	3,51	4,15
240	2,71	3,86	4,45
270	3,02	4,18	4,63
300	3,15	4,43	4,82
330	3,33	4,65	4,97
360	3,49	4,86	5,13
390	3,63	5,05	5,21
420	3,79	5,22	
450	3,94	5,33	
480	4,09	5,40	
510	4,23	5,46	
540	4,36	5,53	
570	4,48		
600	4,56		
630	4,65		
660	4,74		
690	4,80		

TABELA A45 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos utilizando 3 peças cisalhantes menores, temperatura a 35°C, vazão de líquido de 400 (l/h) em diferentes vazões de ar.

CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO (mg/l)			
	Q _A - 198,0 (ml/min)	Q _A - 383,0 (ml/min)	Q _A - 522,0 (ml/min)
	TA - 28 ^o C	TA - 28 ^o C	TA - 29 ^o C
TEMPO (s)	PA – 710 (mmHg)	PA – 716 (mmHg)	PA – 713 (mmHg)
30	0,53	0,97	0,63
60	0,75	1,30	1,05
90	0,87	1,52	1,75
120	1,01	2,15	2,32
150	1,23	2,57	2,86
180	1,46	3,07	3,54
210	1,89	3,48	4,11
240	2,15	3,83	4,33
270	2,37	4,14	4,53
300	2,62	4,35	4,70
330	2,89	4,51	4,85
360	3,12	4,63	4,96
390	3,39	4,75	
420	3,58		
450	3,72		
480	3,85		
510	3,97		
540	4,06		
570	4,16		
600	4,25		
630	4,33		
660	4,42		
690	4,49		
720	4,53		
750	4,56		

APÊNDICE B

TABELA B1 – Valores das concentrações de oxigênio durante experimentos sem a utilização de peças cisalhantes e utilizando 3 peças cisalhantes, temperatura a 30°C, vazão de líquido de 200 (l/h) e vazão de ar de 1600ml/min.

Concentração de Oxigênio (mg/l)		
SPC		3 PC
TA - 28°C		TA - 30°C
TEMPO (s)	PA - 713(mmHg)	PA - 713 (mmHg)
30	0,85	0,81
60	1,48	1,97
90	1,82	2,72
120	2,12	3,20
150	2,49	3,71
180	2,88	4,07
210	3,36	4,63
240	3,49	4,90
270	3,63	5,05
300	3,80	5,17
330	3,93	5,27
360	4,17	5,36
390	4,23	5,44
420	4,32	5,72
450	4,41	
480	4,52	
510	4,58	
540	4,63	
570	4,73	
600	4,76	
630	4,82	
660	4,86	
690	4,86	
720	4,88	
750	4,89	

APÊNDICE C

TABELA C1 – Valores da eficiência de transferência de massa em função da razão entre a vazão de ar e de líquido (ϕ) a 20°C.

Q _A (ml/min)	ϕ	TE (kg O ₂ /kWh)				
		SPC	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
198,0	0,0594	0,18	0,35	0,38	0,42	0,34
	0,0396	0,17	0,24	0,36	0,42	0,28
	0,0297	0,15	0,25	0,29	0,38	0,27
383,0	0,1149	0,32	0,53	0,92	1,01	0,75
	0,0600	0,29	0,52	0,80	0,84	0,67
	0,0575	0,31	0,48	0,74	0,77	0,55
522,0	0,1566	0,54	0,80	1,07	1,16	0,83
	0,1044	0,38	0,67	0,87	0,93	0,74
	0,0783	0,32	0,65	0,78	0,82	0,66

TABELA C2 – Valores da eficiência de transferência de massa em função da razão entre a vazão de ar e de líquido (ϕ) a 30°C.

Q _A	ϕ	TE (kg O ₂ /kWh)				
		SPC	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
198,0	0,0594	0,19	0,31	0,39	0,43	0,32
	0,0396	0,18	0,23	0,38	0,43	0,32
	0,0297	0,14	0,22	0,33	0,38	0,26
383,0	0,1149	0,32	0,59	0,84	1,03	0,68
	0,0600	0,31	0,52	0,70	0,81	0,62
	0,0575	0,29	0,42	0,68	0,77	0,49
522,0	0,1566	0,50	0,74	0,92	1,14	0,78
	0,1044	0,39	0,64	0,81	0,89	0,65
	0,0783	0,31	0,65	0,80	0,86	0,66

TABELA C3 – Valores da eficiência transferência de massa em função da razão entre a vazão de ar e de líquido (ϕ) a 35°C.

Q_A	ϕ	TE (kg O ₂ /kWh)				
		SPC	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
198,0	0,0594	0,19	0,30	0,37	0,43	0,31
	0,0396	0,18	0,23	0,37	0,44	0,33
	0,0297	0,16	0,23	0,35	0,38	0,27
383,0	0,1149	0,36	0,59	0,82	0,99	0,70
	0,0600	0,31	0,54	0,70	0,84	0,63
	0,0575	0,30	0,41	0,68	0,75	0,52
522,0	0,1566	0,50	0,72	0,92	1,17	0,76
	0,1044	0,38	0,65	0,80	0,91	0,67
	0,0783	0,32	0,68	0,79	0,85	0,7

APÊNDICE D

TABELA D1– Valores do coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da razão entre a vazão de ar e de líquido (ϕ) a 20°C.

Q _A (ml/min)	ϕ	K _{La} (h ⁻¹)				
		SPC	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
198,0	0,0594	1,73	3,30	3,67	4,03	3,30
	0,0396	2,42	3,50	5,17	6,04	4,07
	0,0297	2,85	4,77	5,60	7,33	5,19
383,0	0,1149	3,06	5,09	8,86	9,68	7,19
	0,0600	4,18	7,46	11,45	11,95	9,62
	0,0575	5,96	9,17	14,05	14,72	10,56
522,0	0,1566	5,12	7,65	10,15	11,09	7,94
	0,1044	5,41	9,50	12,45	13,38	10,54
	0,0783	6,19	12,28	14,85	15,74	12,65

TABELA D2 – Valores do coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da razão entre a vazão de ar e de líquido (ϕ) a 30°C.

Q _A (ml/min)	ϕ	K _{La} (h ⁻¹)				
		SPC	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
198,0	0,0594	2,19	3,53	4,46	5,02	3,70
	0,0396	3,21	4,06	6,60	7,48	5,55
	0,0297	3,32	5,02	7,67	8,91	6,03
383,0	0,1149	3,75	6,82	9,66	11,86	7,87
	0,0600	5,39	9,02	12,13	13,96	10,70
	0,0575	6,59	9,77	15,71	17,77	11,34
522,0	0,1566	5,80	8,57	10,69	13,16	9,06
	0,1044	6,76	11,13	14,04	15,43	11,27
	0,0783	7,24	14,92	18,45	19,99	15,21

TABELA D3 – Valores do coeficiente volumétrico de transferência de massa em função da razão entre a vazão de ar e de líquido (ϕ) a 35°C.

Q_A (ml/min)	ϕ	K_{La} (h^{-1})				
		SPC	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
198,0	0,0594	2,40	3,74	4,55	5,32	3,89
	0,0396	3,40	4,33	6,80	8,19	6,18
	0,0297	3,94	5,78	8,70	9,45	6,75
383,0	0,1149	4,42	7,31	10,15	12,20	8,60
	0,0600	5,78	9,96	12,91	15,48	11,64
	0,0575	7,51	10,13	16,83	18,40	12,72
522,0	0,1566	6,18	8,87	11,41	14,54	9,37
	0,1044	7,01	12,12	14,78	16,97	12,40
	0,0783	7,94	16,74	19,54	20,99	17,28

APÊNDICE E

TABELA E1 – Valores da vazão de ar em função do número adimensional $(Q_L)/(L^3 k_{ia})$ em diferentes vazões de líquido a 20°C.

Q_L (l/h)	Q_A (ml/min)	$(Q_L)/(L^3 k_{ia})$				
		SPC	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
200	198,0	0,188	0,0987	0,0887	0,0808	0,0987
	383,0	0,106	0,064	0,0368	0,0336	0,0453
	522,0	0,0636	0,0426	0,0321	0,0294	0,041
300	198,0	0,202	0,14	0,0945	0,0809	0,12
	383,0	0,117	0,0655	0,0427	0,0409	0,0508
	522,0	0,0903	0,0514	0,0392	0,0365	0,0463
400	198,0	0,229	0,137	0,116	0,0889	0,125
	383,0	0,109	0,071	0,0464	0,0442	0,0617
	522,0	0,105	0,053	0,0439	0,0414	0,0515

TABELA E2 – Valores da vazão de ar em função do número adimensional $(Q_L)/(L^3 k_{ia})$ em diferentes vazões de líquido a 30°C.

Q_L (l/h)	Q_A (ml/min)	$(Q_L)/(L^3 k_{ia})$				
		SPC	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
200	198,0	0,149	0,0923	0,073	0,0649	0,088
	383,0	0,0868	0,0478	0,0337	0,0275	0,0414
	522,0	0,0561	0,038	0,0305	0,0247	0,0359
300	198,0	0,152	0,12	0,074	0,0653	0,088
	383,0	0,0906	0,0542	0,0403	0,035	0,0457
	522,0	0,0723	0,0439	0,0348	0,0317	0,0433
400	198,0	0,196	0,13	0,0849	0,0731	0,108
	383,0	0,0988	0,0667	0,0415	0,0367	0,0574
	522,0	0,09	0,0437	0,0353	0,0326	0,0429

TABELA E3 – Valores da vazão de ar em função do número adimensional $(Q_L)/(L^3 k_{ia})$ em diferentes vazões de líquido a 35°C.

Q_L (l/h)	Q_A (ml/min)	$(Q_L)/(L^3 k_{ia})$				
		SPC	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
200	198,0	0,136	0,0871	0,0716	0,0612	0,0837
	383,0	0,0737	0,0446	0,0321	0,0267	0,0379
	522,0	0,0527	0,0367	0,0285	0,0224	0,0348
300	198,0	0,144	0,113	0,0718	0,0596	0,079
	383,0	0,0845	0,049	0,0378	0,0316	0,042
	522,0	0,0697	0,0403	0,0331	0,0288	0,0394
400	198,0	0,165	0,113	0,0749	0,0689	0,0965
	383,0	0,0867	0,0643	0,0387	0,0354	0,0512
	522,0	0,082	0,0389	0,0333	0,031	0,0378

APÊNDICE F

TABELA F1 – Valores da eficiência de transferência de oxigênio e do número adimensional em diferentes vazões de ar a 20°C.

Q _A (ml/min)	$\rho Q_L^2 / L^3 \sigma_L$	TE (kg O ₂ /kWh)				
		SPC	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
198,0	$6,4207 \times 10^{-5}$	0,18	0,35	0,38	0,42	0,34
	$1,4447 \times 10^{-4}$	0,17	0,24	0,36	0,42	0,28
	$2,5683 \times 10^{-4}$	0,15	0,25	0,29	0,38	0,27
383,0	$6,4207 \times 10^{-5}$	0,32	0,53	0,92	1,01	0,75
	$1,4447 \times 10^{-4}$	0,29	0,52	0,80	0,84	0,67
	$2,5683 \times 10^{-4}$	0,31	0,48	0,74	0,77	0,55
522,0	$6,4207 \times 10^{-5}$	0,54	0,80	1,07	1,16	0,83
	$1,4447 \times 10^{-4}$	0,38	0,67	0,87	0,93	0,74
	$2,5683 \times 10^{-4}$	0,32	0,65	0,78	0,82	0,66

TABELA F2 – Valores da eficiência de transferência de oxigênio e do número adimensional em diferentes vazões de ar a 30°C.

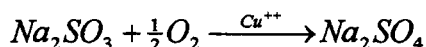
Q _A (ml/min)	$\rho Q_L^2 / L^3 \sigma_L$	TE (kg O ₂ /kWh)				
		SPC	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
198,0	$6,4597 \times 10^{-5}$	0,19	0,31	0,39	0,43	0,32
	$1,4534 \times 10^{-4}$	0,18	0,23	0,38	0,43	0,32
	$2,5839 \times 10^{-4}$	0,14	0,22	0,33	0,38	0,26
383,0	$6,4597 \times 10^{-5}$	0,32	0,59	0,84	1,03	0,68
	$1,4534 \times 10^{-4}$	0,31	0,52	0,70	0,81	0,62
	$2,5839 \times 10^{-4}$	0,29	0,42	0,68	0,77	0,49
522,0	$6,4597 \times 10^{-5}$	0,50	0,74	0,92	1,14	0,78
	$1,4534 \times 10^{-4}$	0,39	0,64	0,81	0,89	0,65
	$2,5839 \times 10^{-4}$	0,31	0,65	0,80	0,86	0,66

TABELA F3 – Valores da eficiência de transferência de oxigênio e do número adimensional em diferentes vazões de ar a 35°C.

Q _A (ml/min)	$\rho Q_L^2/L^3 \sigma_L$	TE (kg O ₂ /kWh)				
		SPC	1 PC	2 PC	3 PC	3 PCM
198,0	$6,5283 \times 10^{-5}$	0,19	0,30	0,37	0,43	0,31
	$1,4689 \times 10^{-4}$	0,18	0,23	0,37	0,44	0,33
	$2,6113 \times 10^{-4}$	0,16	0,23	0,35	0,38	0,27
383,0	$6,5283 \times 10^{-5}$	0,36	0,59	0,82	0,99	0,70
	$1,4689 \times 10^{-4}$	0,31	0,54	0,70	0,84	0,63
	$2,6113 \times 10^{-4}$	0,30	0,41	0,68	0,75	0,52
522,0	$6,5283 \times 10^{-5}$	0,50	0,72	0,92	1,17	0,76
	$1,4689 \times 10^{-4}$	0,38	0,65	0,80	0,91	0,67
	$2,6113 \times 10^{-4}$	0,32	0,68	0,79	0,85	0,7

ANEXO A

De acordo com RAMALHO (1983), a reação de desoxigenação é a seguinte:



com uma razão estequiométrica entre sulfito e oxigênio dado por:

$$Na_2SO_3 / \frac{1}{2}O_2 = 126 / 16 = 7,9$$

ou seja, 7,9 ppm de SO_3^- são necessários para remover 1 ppm de O_2 . De acordo com este autor a concentração de saturação de oxigênio em água a 35°C (maior temperatura utilizada nos experimentos) é 9,2mg/l. Assim para a remoção de 9,2 mg/l de O_2 será necessária uma concentração 72,68mg/l de SO_3^- .

Ou seja, para cada litro de água, 72,68 mg de SO_3^- são necessários para remover todo o oxigênio da água, como o volume útil do sistema utilizado nos experimentos foi de 6,5 litros, 0,47242g de sulfito mais um excesso 16,5% foram utilizados para remover o oxigênio da água.