

EFICIÊNCIA DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA GÁS-LÍQUIDO POR AR DIFUSO.

Ariel Ali Bento Magalhães¹; Paulo Sérgio de Andrade Junior²; Marcio Ricardo Salla³

RESUMO --- Neste artigo estudou-se a eficiência de transferência de massa de ar difuso no meio líquido em uma coluna com taxa de aplicação superficial de 63,69 a 254,70 m³/m².h. As bolhas foram geradas por um difusor plástico microporoso, instalado na base da coluna de aeração. A coluna possui seção transversal circular de 100 mm de diâmetro, com altura de 4 m. O processo de aeração conduziu à determinação do coeficiente de transferência de massa global K_{La} (s⁻¹). Variou-se o nível líquido entre 1 m a 4 m e a vazão de 500 L/h a 2000 L/h. Com o auxílio de medidor de oxigênio, foram registrados os valores da concentração de OD na água. Obteve-se a equação $K_{La(20)} = 5,3 \cdot 10^{-5} \cdot Q^{0,84}$, sendo a vazão Q em L/h, que permite prever o valor de K_{La(20)} em função da vazão afluyente para estudos realizados em colunas de aeração com esta configuração, onde todas as configurações estudadas forneceram um intervalo de K_{La} entre 0,0026 s⁻¹ até 0,0493 s⁻¹. Independente do nível líquido estudado, a vazão de aeração próxima a 1000 L/h gera maior eficiência de transferência de massa de oxigênio, evidenciando a importância das coalescências das bolhas no processo de transferência de massa.

ABSTRACT --- In this article was studied the mass transfer efficiency of diffused air in liquid medium in a column with surface application rate of 63.69 until 254.70 m³/m².h. The bubbles were generated by an air diffuser microporous plastic, located in the base of aeration column. The column utilized in the study has a circular section with the diameter of 100 mm, with 4 m high. The aeration process leads to the determination of mass transfer coefficient K_{La} (s⁻¹). The liquid level ranged from 1 m up to 4 m and the air flow from 500 L/h to 2000 L/h. With the dissolved oxygen meter, samples were collected in order to determinate the dissolved oxygen concentration. It was found the equation $K_{La} (s^{-1}) = 5,3 \cdot 10^{-5} \cdot Q^{0,84}$ in which the air flow Q in L/h, allows the prevision of the K_{La(20)} parameter ranging the air flow in the diffuser for studies with the same configuration, where the results achieved for all the conformations analyzed ranged from 0.0026s⁻¹ until 0.0493s⁻¹. For all the liquid levels studied, the results achieved showed up that the air flow near to 1000 L/h generates higher oxygen mass transfer efficiency, pointing out the importance of the bubbles coalescence at the mass-transfer process.

PALAVRAS-CHAVE: transferência de massa gás-líquido, difusor, oxigênio dissolvido.

1 – Graduanda em Engenharia Civil, FECIV/UFU, Avenida João Naves de Ávila, 2121, CEP: 38400-902. Uberlândia/MG. E-mail arielali@gmail.com

2 – Graduando em Engenharia Civil, FECIV/UFU, Avenida João Naves de Ávila, 2121, CEP: 38400-902. Uberlândia/MG. E-mail andrade.paulo91@gmail.com

3 – Professor Adjunto II, FECIV/UFU, Avenida João Naves de Ávila, 2121, CEP: 38400-902. Uberlândia/MG. E-mail mrsalla@feciv.ufu.br

INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais, com lançamento desgovernado de efluentes domésticos e industriais nos corpos de água, apenas a autodepuração não tem a capacidade de devolver as características iniciais do rio. Portanto, é necessário o devido tratamento dos efluentes antes do lançamento no rio, para evitar a poluição ou até mesmo a “morte” deste. O tratamento dos efluentes nada mais é do que uma autodepuração acelerada, com as características hidrodinâmicas e de qualidades dos efluentes controladas.

Nos processos ou etapas de tratamento de esgoto sanitário, a aeração está inserida na etapa do tratamento biológico, uma vez que o oxigênio transferido ao efluente através da aeração de bolhas é primordial para a sobrevivência de todos os organismos aeróbios que decompõem aerobicamente a matéria orgânica. Sendo assim, é de extrema importância o conhecimento dos processos de transferência de oxigênio à massa líquida através da aeração de bolhas ascensionais de oxigênio. Em geral, as concentrações de oxigênio e de outros gases em meio líquido depende da pressão parcial do gás no meio externo, da temperatura da água e da quantidade de substâncias dissolvidas (BRAGA *et al.*, 2007).

No sistema de tratamento de esgoto sanitário, o fenômeno de aeração pode acontecer através de três métodos: por meio de difusores, por meio de agitadores mecânicos ou por meio da combinação dos processos anteriores (JORDÃO *et al.*, 2005). Neste trabalho utilizou-se apenas o método de ar difuso, através de difusor plástico microporoso que gerou bolhas finas de 0,3mm a 1,0mm, fundamental para a otimização do processo de transferência de massa gás-líquido, em virtude da elevada área interfacial de contato gás-líquido.

Além da importância do tamanho das bolhas ascensionais, a literatura da área descreve que a eficiência dos difusores está também extremamente ligada à profundidade do difusor no tanque ou coluna de aeração. Afirma-se que, quanto maior a profundidade, maior o tempo de detenção das bolhas, aumentando, com isso, a eficiência de transferência de massa. Todavia, mantendo-se o nível líquido fixo, o aumento da vazão afluente de ar aumentará a velocidade ascensional das bolhas e a ocorrência de coalescência, diminuindo o tempo de contato gás-líquido. Objetivando avaliar a profundidade e vazão ótima para a eficiência de transferência de massa é que este artigo foi realizado.

PROCESSOS DE AERAÇÃO E DEAERAÇÃO DE GASES NA ÁGUA

No processo de aeração, de acordo com Adeney *et al.* (1919) apud Schulz (2003), o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao déficit da saturação do gás no líquido, como ilustrado na equação (1).

$$J = (1/A).dM/dt = k_L.(C_s - C_b) \quad (1)$$

Onde: J é o fluxo de massa por unidade de área, $[M/L^2t]$; A é a área da interface líquido-gás, $[L^2]$; M é a massa do gás dissolvido, $[M]$; t é a tempo, $[t]$; K_L é o coeficiente de transferência de massa, $[L/t]$; C_s é a concentração de saturação do líquido, $[M/L^3]$; C_b é a concentração do gás dissolvido no líquido em um determinado tempo, $[M/L^3]$.

Após realizados os devidos cálculos e correlações, a equação (2) descreve o processo de absorção do gás no meio líquido.

$$C = C_s - (C_s - C_0)e^{(-K_L a t)} \quad (2)$$

Onde: C é a concentração do gás no meio líquido no tempo t, $[M/L^3]$; C_s é a concentração de saturação do líquido, $[M/L^3]$; C_0 é a concentração inicial do gás no meio líquido, $[M/L^3]$; $K_L a$ é o coeficiente de transferência de massa global no meio líquido, $[1/t]$; a corresponde à relação entre a área de contato interfacial $A[L^2]$ e o volume líquido $V [L^3]$ na coluna de aeração.

Já no processo da deaeração, tem-se a equação (3).

$$C = C_s e^{(-K_T t)} \quad (3)$$

Onde: C é a concentração do gás no meio líquido no tempo t, $[M/L^3]$; C_s é a concentração de saturação do líquido, $[M/L^3]$; K_T é o coeficiente de deaeração do oxigênio no meio líquido, $[1/t]$.

De acordo com Schulz (2003), os coeficientes de aeração e de deaeração dependem das características hidráulicas do corpo de água, das temperaturas do ar e da água, entre outras características. No presente artigo foi dado enfoque apenas na influência da vazão de ar e do nível líquido na eficiência de transferência de massa global.

TEMPERATURA E COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA

O esgoto sanitário possui diversas características que influenciam na qualidade final do efluente tratado, entre estas se destaca a temperatura. De acordo com Von Sperling (2005), a variação da temperatura da água residuária afeta tanto positivamente quanto negativamente na remoção física, química e biológica da matéria orgânica. De modo positivo, o aumento da temperatura da água faz com que a viscosidade do meio líquido diminua, promovendo rápida sedimentação dos sólidos presentes na água, otimizando o tratamento primário. Além disso, o aumento da temperatura quase sempre aumenta a velocidade das reações químicas. Afirma-se negativamente que o aumento da temperatura diminui a solubilidade dos gases no líquido, isso porque as partículas estão em grande agitação, tornando-as mais difíceis de dissolver, além do que o

aumento da temperatura influencia negativamente no metabolismo dos microorganismos responsáveis pela conversão da matéria orgânica. Portanto a variação da temperatura influencia na transferência de massa gás-líquido.

De acordo com Jordão *et al.* (2005), através da equação (4), o coeficiente de transferência de massa global obtido em uma temperatura qualquer no meio líquido é relacionado com o coeficiente à temperatura ambiente (20°C).

$$K_{La(T)} = K_{La(20)} \cdot \theta^{(T-20)} \quad (4)$$

Onde: $K_{La(T)}$ é o coeficiente de transferência de massa gás-líquido global a uma certa temperatura T; $K_{La(20)}$ é o coeficiente de transferência de massa gás-líquido a 20°C; θ é o fator de correção que varia entre 1,015 e 1,040.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados e suas respectivas disposições no aparato experimental estão ilustrados na Figura 1.

Coluna de Aeração

A coluna de aeração utilizada constitui-se de uma tubulação de PVC de 100 mm de diâmetro interno e 4 m de altura. Essa coluna foi fixada no Laboratório de Saneamento da Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Federal de Uberlândia - utilizando braçadeiras específicas e uma estrutura em aço na base para sustentá-la.

A base da coluna é formada por uma redução excêntrica 150 mm x 100 mm em PVC, com o difusor de ar e uma flange de 3/4” instalados na base, que permitiu a recirculação e esvaziamento do líquido na coluna. O difusor de ar é de material plástico microporoso capaz de gerar bolhas finas (1 mm a 3 mm de diâmetro). A parte superior da coluna permaneceu aberta a fim de permitir o escape das bolhas de ar não transferidas para o meio líquido. Na lateral da coluna foi instalada uma mangueira de silicone que funcionou como um piezômetro para a visualização do nível líquido na coluna.

Também foi instalado um tee 100 mm com redução para 50 mm para permitir a colocação do medidor de oxigênio dissolvido portátil dentro da coluna. A fixação de apenas um medidor está fundamentada em testes hidrodinâmicos com o corante azul de metileno como traçador realizados por Salla (2002). Nestes testes, através da injeção de uma concentração não controlada do corante em diversos pontos em coluna com seção transversal quadrada com 19 cm de lado e 2 m de altura, em duas vazões diferentes de ar comprimido afluente ao difusor (1 L/min e 5 L/min), comprovou-se

que, em menos de 30 segundos de aeração em escoamento descontínuo ou batelada, ocorreu mistura completa do corante.

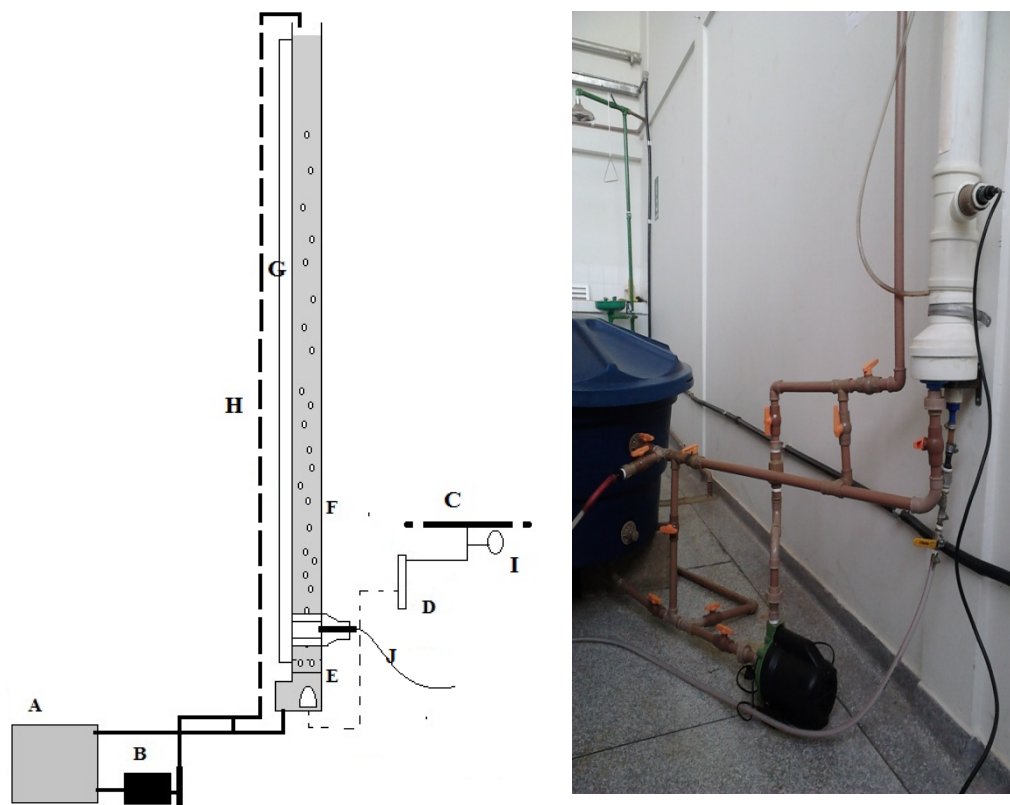


Figura 1 – Esquema da montagem experimental utilizada, sendo: **A**: Reservatório com capacidade de 250 litros; **B**: Conjunto motor-bomba de 1/3 cv; **C**: Tubulação de ar comprimido; **D**: Rotâmetro; **E**: Difusor de ar microporoso; **F**: Coluna de Aeração; **G**: Piezômetro; **H**: Trecho de recalque para deaeração; **I**: Redutor de pressão; **J**: Medidor de oxigênio dissolvido portátil.

Sistema elevatório

Para o processo de deaeração utilizou-se um conjunto motor-bomba de 1/3 cv para promover a mistura de sulfito de sódio anidro (Na_2SO_3) no meio líquido. O sistema elevatório promoveu a recirculação satisfatoriamente.

Tubulação de ar comprimido

De acordo com a literatura da área, sabe-se que a eficiência de transferência de massa gás-líquido utilizando o oxigênio puro como gás da aeração é aproximadamente 4 vezes maior do que a utilização do ar proveniente de compressores (GULLIVER, *et. al.*1993). Isso faz com que a taxa de transferência de massa gás-líquido em água limpa seja muito rápida, inviabilizando seu estudo. Com isso, escolheu-se ar comprimido como gás afluente à coluna, aproveitando a rede de ar comprimido existente no Laboratório de Saneamento da FECIV/UFU. É importante salientar que a

rede de ar comprimido possui um filtro de ar necessário para impedir o entupimento dos poros do difusor no decorrer dos trabalhos experimentais.

Rotâmetro e Redutor de Pressão

O rotâmetro teve a função de medir a vazão de ar comprimido afluyente à coluna, graduado de 200 L/h até 2000 L/h. Para o controle adequado da entrada de oxigênio no difusor foi instalado um redutor de pressão na rede de ar comprimido, não danificando assim o difusor de ar.

Medidor de oxigênio dissolvido

De acordo com a *ASCE Standard* (1984), a concentração de oxigênio dissolvido em águas limpas ou águas de abastecimento público pode ser medida através de sonda com eletrodo de membrana (medidor portátil) ou através do Método *Winkler*.

Neste artigo foi utilizado um medidor portátil, que consiste de um eletrodo ligado a um sistema de amplificação de sinal. A sonda (eletrodo) é separada do meio líquido por uma membrana permeável ao oxigênio. Quando a sonda está em contato com o líquido, o oxigênio dissolvido presente no lado líquido difunde-se através da membrana, sendo reduzido eletroquimicamente após passar por um cátodo de potencial elétrico constante, gerando uma corrente elétrica (MOMESSO, 1996).

Foi realizado um teste de confiabilidade do medidor de OD, no qual inicialmente encheu-se um bquer com capacidade de 2 litros com água da rede pública de abastecimento e posteriormente deaerou-se a amostra com 0,42 g Na₂SO₃/L através de homogeneização manual. Na sequência, com a instalação de um difusor de aquário conectado ao fluxo de ar através de uma bomba à vácuo adaptada, iniciou-se a aeração da água com vazão desconhecida. A sonda do medidor de oxigênio dissolvido foi fixada próxima ao turbilhonamento ocasionado pelas bolhas ascensionais, uma vez que se evitou posicionar a sonda em águas paradas, tomando o devido cuidado para impedir que bolhas ascensionais ficassem aderidas à membrana da sonda, o que camuflaria o valor real da concentração de oxigênio dissolvido.

O teste realizado apresentou resultado satisfatório, garantindo ao medidor de oxigênio dissolvido a confiabilidade desejada.

Deaeração

A operação de deaeração consiste na retirada do máximo possível da concentração de oxigênio dissolvido da água. De acordo com Salla (2002), existem três métodos de deaeração da água, sendo: método mecânico, gás de arraste e método químico.

O método mecânico consiste em um sistema fechado de recirculação, onde, no trecho de sucção, cria-se uma região com alta velocidade e baixa pressão, por intermédio de uma passagem

com seção transversal menor que a seção do trecho de sucção. Neste método, quando o oxigênio dissolvido passa pela região de baixa pressão (menor que a pressão atmosférica), o oxigênio deixa a solução na forma de bolha, sendo, daí, liberado para a atmosfera. Trata-se de um método pouco eficiente, visto que se alcança $C_o = 4,00$ mg/L após 6 horas de bombeamento.

O método de gás de arraste (*stripping*) impõe apenas o borbulhamento de um gás puro, por exemplo, nitrogênio, na água que contem oxigênio. Como a pressão parcial do oxigênio é menor dentro das bolhas do que no líquido, há passagem deste gás para as bolhas que, finalmente, se perdem na atmosfera através da superfície.

Já o método químico, o qual utiliza sulfito de sódio anidro (Na_2SO_3), é sugerido pela *ASCE Standard* (1984) e foi utilizado neste artigo. Pode gerar interferência na determinação do oxigênio dissolvido devido à presença em excesso do produto químico. Apesar desse inconveniente, a deaeração total ($C_o = 0,0$ mg/L) é atingida em apenas alguns minutos, de acordo com a *ASCE Standard* (1984), Salla (2002) e Schulz (1989).

Neste trabalho, na operação de deaeração, o Na_2SO_3 foi pré-diluído em 1 litro de água. Na seqüência, esta pré-diluição foi lançada no reservatório e, posteriormente, iniciado a mistura através da recirculação pelo sistema elevatório. Em todos os experimentos realizados a recirculação para deaeração do meio líquido durou aproximadamente 10 minutos.

Aeração

As características da coluna de aeração e do difusor de ar responsáveis pela geração das bolhas ascensionais já foram citadas anteriormente. Utilizou-se ar comprimido como gás da aeração, uma vez que a transferência de massa é mais lenta, permitindo melhor avaliação da transferência de massa gás-líquido.

Na saída da tubulação de ar comprimido, este passou, na seqüência, por um redutor de pressão, um rotâmetro e, finalmente, entrou no difusor microporoso. A transferência de massa gás-líquido ocorre pela área interfacial total formada pelas bolhas ascensionais, onde, neste trabalho, a evolução da concentração de oxigênio dissolvido foi determinada próximo à base da coluna até que fosse alcançada a saturação da concentração de oxigênio dissolvido.

Configurações analisadas

A Tabela 1 ilustra as configurações estudadas, seguindo os mesmos intervalos dos trabalhos científicos encontrados na literatura da área, onde a temperatura do meio líquido não foi controlada.

Tabela 1 – Configurações analisadas.

Ensaio	Na ₂ SO ₃ (g)	Nível líquido (m)	Vazão (L/h)
1	3,30	1,0	500
2			1000
3			1500
4			2000
5	4,95	1,5	500
6			1000
7			1500
8			2000
9	6,59	2,0	500
10			1000
11			1500
12			2000
13	9,89	3,0	500
14			1000
15			1500
16			2000
17	13,19	4,0	500
18			1000
19			1500
20			2000

Determinação do coeficiente de transferência de massa global $K_L a$ (s^{-1})

As configurações estudadas permitiram encontrar uma curva não-linear de concentração C (mg/L) de oxigênio dissolvido em função do tempo t (s). O valor do coeficiente de transferência de massa global $K_L a$ foi obtido através da linearização da equação (2), resultando na equação (5). Com o lançamento dos dados de $-\ln(C_s - C)/(C_s - C_0)$ na ordenada e do tempo t na abscissa, a tangente da reta formada corresponde ao coeficiente de transferência de massa global $K_L a$.

$$-\ln(C_s - C)/(C_s - C_0) = K_L a \cdot t \quad (5)$$

Onde: C é a concentração de oxigênio dissolvido no tempo t qualquer, em mg/L; C_s é a concentração de saturação do oxigênio dissolvido, em mg/L; C_0 é a concentração de oxigênio dissolvido no tempo zero, em mg/L (para este artigo $C_0 = 0,0$ mg/L para a maioria dos experimentos, devido à deaeração por processo químico); t é o tempo, em minutos; $k_L a$ é o coeficiente de transferência de massa global, em s^{-1} ; a é relação entre a área interfacial total das bolhas (A) e o volume total ocupado pelas bolhas (V_L), em m^{-1} .

Eficiência de transferência de oxigênio na água

Neste artigo foi estimada a eficiência da transferência de oxigênio na água, cujos resultados foram comparados com os valores obtidos por Innocentini (1996) e Salla (2002), os quais trabalharam com os mesmos intervalos de vazão, mas com seções transversais quadradas e menores

níveis líquidos. A eficiência de transferência de massa de oxigênio na água η foi definida pela relação entre a massa de O_2 transferida pela massa de O_2 fornecida à coluna. De acordo com Innocentini (1996), a equação da eficiência de transferência de massa com aeração de bolhas através de difusor poroso resulta na equação (6).

$$\eta = \frac{(C_s - C_0) \cdot V_L}{Q \cdot X_{O_2} \cdot \rho_{ar} \cdot t_{aeração}} \quad (6)$$

Onde: η é eficiência de transferência de massa de oxigênio na água, em %; C_s é a concentração de saturação do oxigênio na água, em mg/l; C_0 é a concentração de oxigênio dissolvido no início da aeração, ou seja, concentração igual a zero ou próximo a zero em todas as configurações aqui estudadas; V_L é o volume de água contido na coluna, em litros; Q é a vazão de aeração, em L/min; X_{O_2} é a fração mássica de oxigênio no ar atmosférico, igual a 0.209; ρ_{ar} é a massa específica do ar atmosférico, em kg/m^3 ; $t_{aeração}$ é o tempo de aeração em cada ensaio, em minutos.

Neste trabalho considerou-se $\rho_{ar} = 1,0 \text{ kg/m}^3$ em todos os ensaios e, também, o tempo de aeração como sendo o tempo em que a concentração de oxigênio dissolvido leva para sair de C_0 até alcançar a saturação.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para melhor entendimento, são apresentados os resultados dos coeficientes de transferência de massa global $K_{L,a}$ para cada nível líquido separadamente, seguido pela variação de $K_{L,a}$ com a vazão para todos os níveis líquidos estudados, finalizando com a determinação da eficiência de transferência de massa global e comparação com outros autores. Todos os experimentos foram realizados mantendo-se a pressão do ar comprimido em 10 N/cm^2 na entrada do difusor. Além disso, as diferentes concentrações de saturação C_s do oxigênio dissolvido para as vazões estudadas estão diretamente relacionadas às diferentes temperaturas do meio líquido, conforme observadas na Tabela 2.

Determinação do coeficiente de transferência de massa global $K_{L,a}$

- Nível líquido $h = 1,0 \text{ m}$

A Figura 2 apresenta os resultados obtidos no estudo de transferência de massa global $K_{L,a}$ para o nível líquido $h = 1,0 \text{ m}$, variando a vazão de 500 L/h até 2000 L/h .

A evolução da concentração de oxigênio dissolvido ao longo do tempo para as vazões estudadas (Figura 2a), evidencia que a saturação de OD do meio líquido é alcançada mais rapidamente para as maiores vazões, deixando claro que a velocidade ascensional para as maiores

vazões não influencia na transferência de massa global, provavelmente pelas poucas coalescências existentes na trajetória ascensional das bolhas.

Através da linearização da equação de absorção de oxigênio obtêm-se o coeficiente de transferência de massa global através da tangente formada pela reta, conforme ilustrado pela Figura 2b, mostrando que o aumento do $K_{L,a}$ é diretamente proporcional ao aumento da vazão de gás afluyente, alcançando $0,0029 \text{ s}^{-1}$, $0,019 \text{ s}^{-1}$, $0,0405 \text{ s}^{-1}$ e $0,0436 \text{ s}^{-1}$, respectivamente para vazão de 500 L/h, 1000 L/h, 1500 L/h e 2000 L/h. As pequenas oscilações observadas na evolução da concentração de OD ao longo do tempo para a vazão de 500 L/h são decorrentes das aderências de bolhas isoladas junto à membrana da sonda do medidor portátil de oxigênio dissolvido.

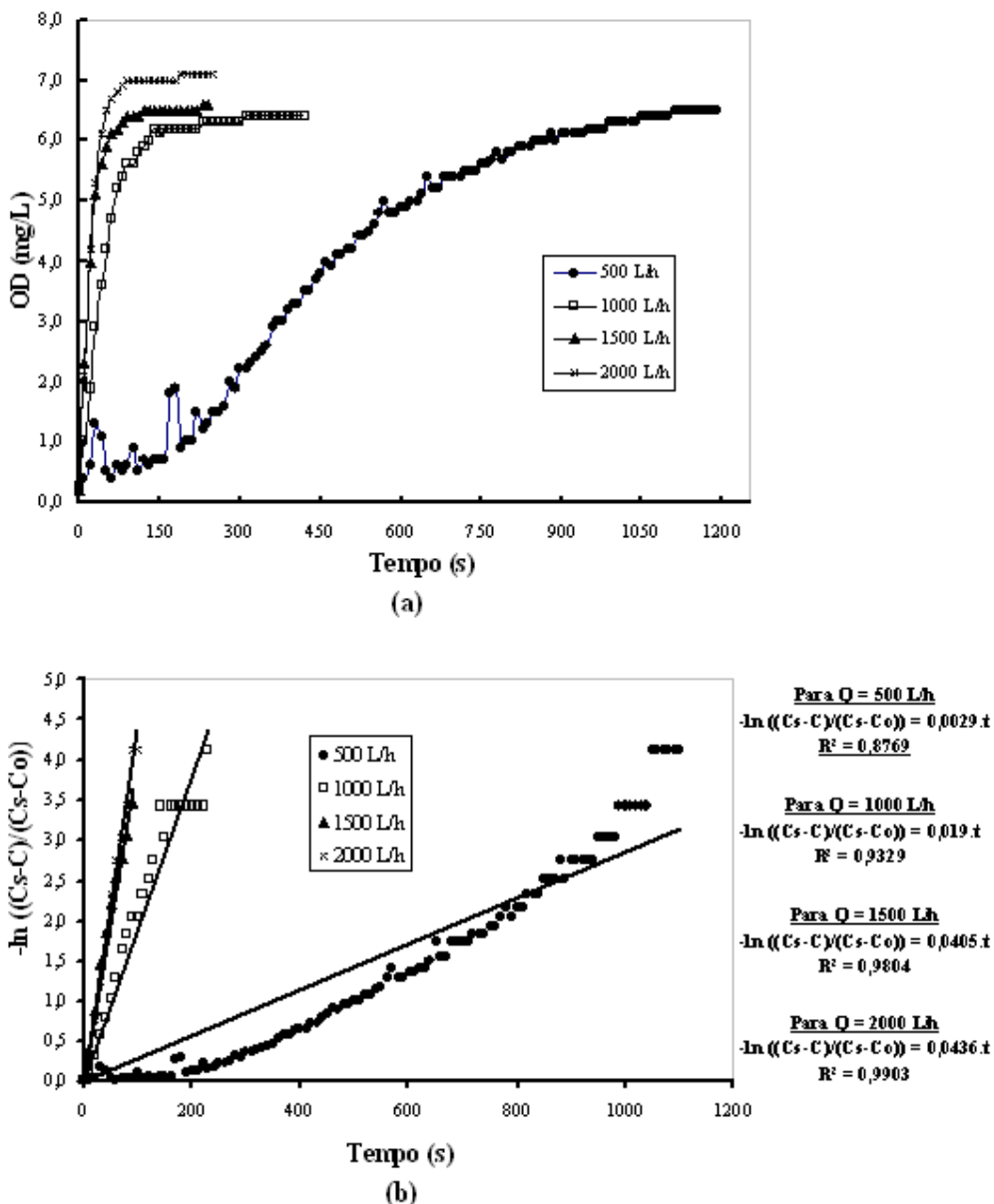


Figura 2 – Estudo de transferência de massa global $K_{L,a}$ para o nível líquido $h = 1,0 \text{ m}$, variando a vazão de 500 L/h até 2000 L/h, sendo: (a) evolução da concentração de OD em função do tempo para todas as vazões analisadas; (b) linearização da equação de absorção de oxigênio para obtenção dos valores de $K_{L,a}$ e R^2 (coeficiente de determinação - para verificar o bom ajuste dos dados medidos e estimados).

- Nível líquido $h = 1,5 \text{ m}$

Os resultados obtidos no estudo de transferência de massa global K_{La} para o nível líquido $h = 1,50\text{m}$, variando a vazão de 500 L/h até 2000 L/h, estão apresentados na Figura 3. A Figura 3a apresenta a evolução da concentração de oxigênio dissolvido ao longo do tempo para as vazões estudadas, evidenciando também que a saturação de OD do meio líquido é alcançada mais rapidamente para as maiores vazões.

Já a Figura 3b ilustra que o aumento do K_{La} é diretamente proporcional ao aumento da vazão de gás afluente. No entanto, o K_{La} foi ligeiramente menor para vazão de 2000 L/h quando comparado com a vazão de 1500 L/h, o que pode ser explicado pelas bolhas maiores formadas para a vazão de 2000 L/h, em virtude de possíveis coalescências ocorridas no movimento ascensional. As bolhas maiores formadas, além de diminuir o tempo de contato em função do aumento da velocidade ascensional, também diminuem a área interfacial de contato gás-líquido. Os valores de K_{La} obtidos foram $0,0045 \text{ s}^{-1}$, $0,0092 \text{ s}^{-1}$, $0,0279 \text{ s}^{-1}$ e $0,0251 \text{ s}^{-1}$, respectivamente, para vazão de 500 L/h, 1000 L/h, 1500 L/h e 2000 L/h.

As pequenas oscilações observadas na evolução da concentração de OD ao longo do tempo para a vazão de 500 L/h e 2000 L/h são decorrentes das aderências de bolhas isoladas junto à membrana da sonda do medidor portátil de oxigênio dissolvido.

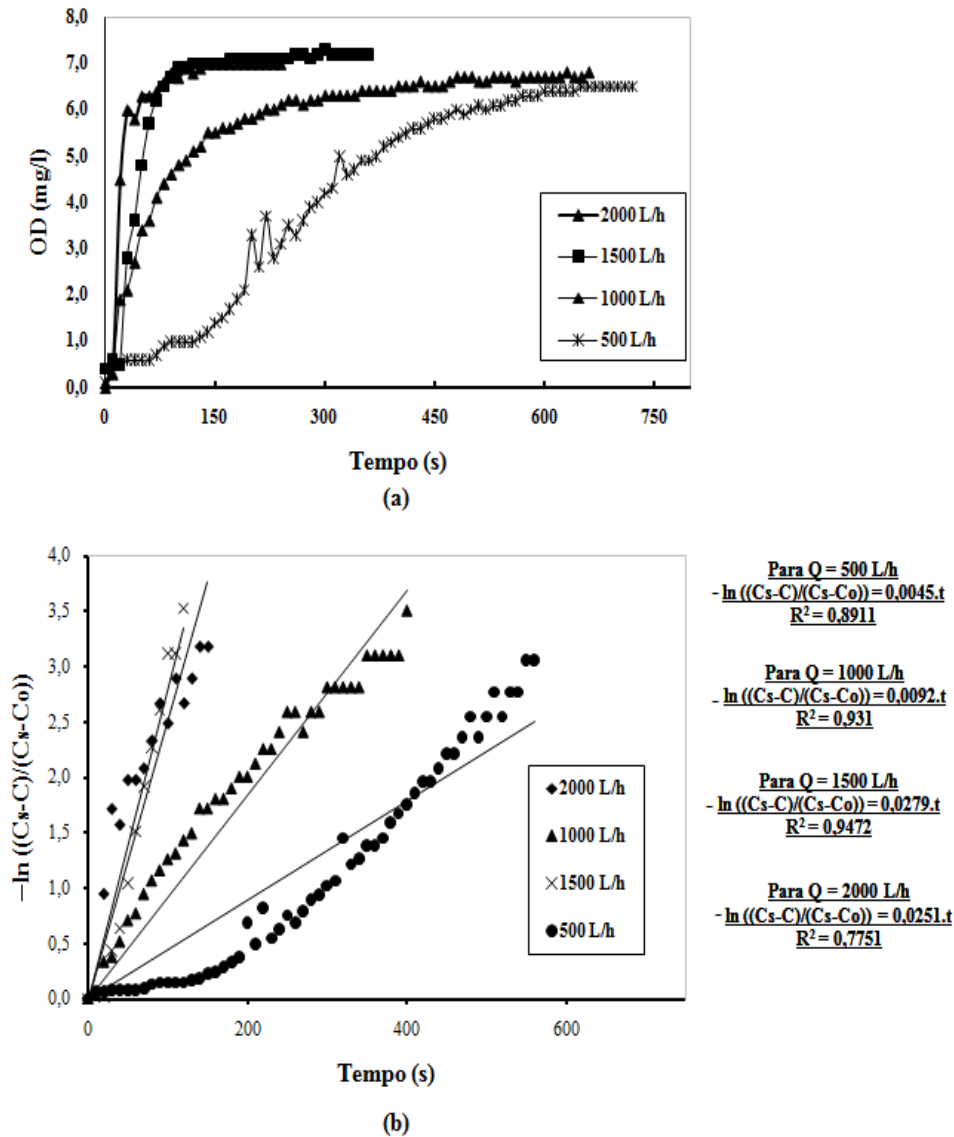


Figura 3 – Estudo de transferência de massa global $K_{L,a}$ para o nível líquido $h = 1,5$ m, variando a vazão de 500 L/h até 2000 L/h, sendo: (a) evolução da concentração de OD em função do tempo para todas as vazões analisadas; (b) linearização da equação de absorção de oxigênio para obtenção dos valores de $K_{L,a}$ e R^2 (coeficiente de determinação - para verificar o bom ajuste dos dados medidos e estimados).

- Nível líquido $h = 2,0$ m

A Figura 4a apresenta a evolução da concentração de oxigênio dissolvido ao longo do tempo para as vazões estudadas, evidenciando que a saturação de OD do meio líquido é alcançada mais rapidamente para as maiores vazões, igual constatação observada para o nível líquido 1,5 m e 2,0 m.

Para o nível líquido de 2,0 m não foi observada a influência direta das coalescências do processo de transferência de massa, como observado na Figura 3b, onde o aumento do $K_{L,a}$ é diretamente proporcional ao aumento da vazão de gás afluente, alcançando $0,0044 \text{ s}^{-1}$, $0,0213 \text{ s}^{-1}$, $0,0242 \text{ s}^{-1}$ e $0,026 \text{ s}^{-1}$, respectivamente para vazão de 500 L/h, 1000 L/h, 1500 L/h e 2000 L/h.

No entanto, pequenas oscilações na evolução da concentração de OD ao longo do tempo foram observadas para a vazão de 500 L/h, similar ao ocorrido em níveis líquidos inferiores.

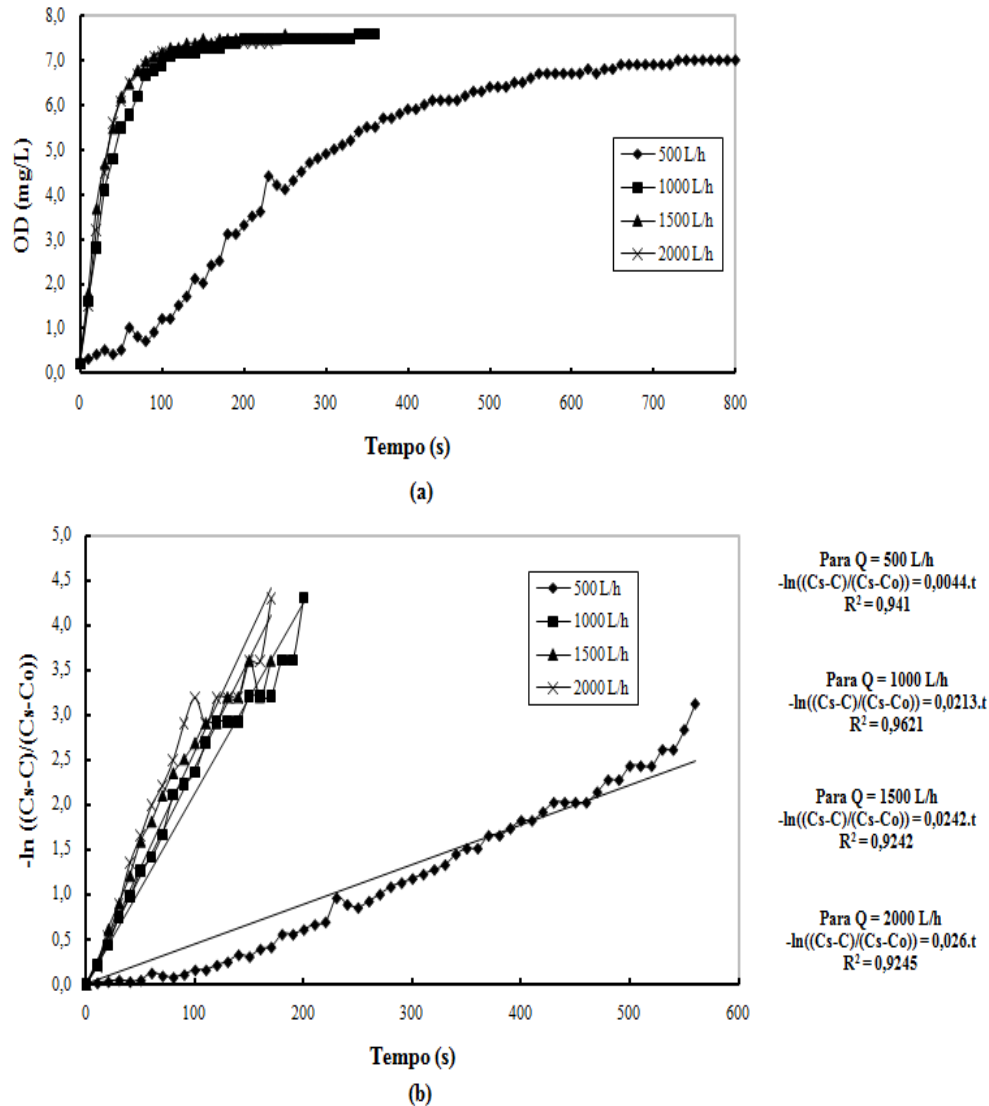


Figura 4 – Estudo de transferência de massa global $K_{L,a}$ para o nível líquido $h = 2,0$ m, variando a vazão de 500 L/h até 2000 L/h, sendo: (a) evolução da concentração de OD em função do tempo para todas as vazões analisadas; (b) linearização da equação de absorção de oxigênio para obtenção dos valores de $K_{L,a}$ e R^2 (coeficiente de determinação - para verificar o bom ajuste dos dados medidos e estimados).

- Nível líquido $h = 3,0$ m

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos no estudo de transferência de massa global $K_{L,a}$ para o nível líquido $h = 3,0$ m, variando a vazão de 500 L/h até 2000 L/h.

A Figura 5a apresenta a evolução da concentração de oxigênio dissolvido ao longo do tempo para as vazões estudadas. Pode-se notar que, conforme ocorrido no nível líquido de 1,5 m, a vazão de 2000 L/h apresentou resultados diferentes dos esperados. Na Figura 5b, o coeficiente de ajuste da reta ($K_{L,a}$) para a vazão de 2000 L/h é menor, alcançando $0,0127 \text{ s}^{-1}$, $0,0236 \text{ s}^{-1}$, $0,0269 \text{ s}^{-1}$ e $0,0157 \text{ s}^{-1}$, respectivamente para vazão de 500 L/h, 1000 L/h, 1500 L/h e 2000 L/h.

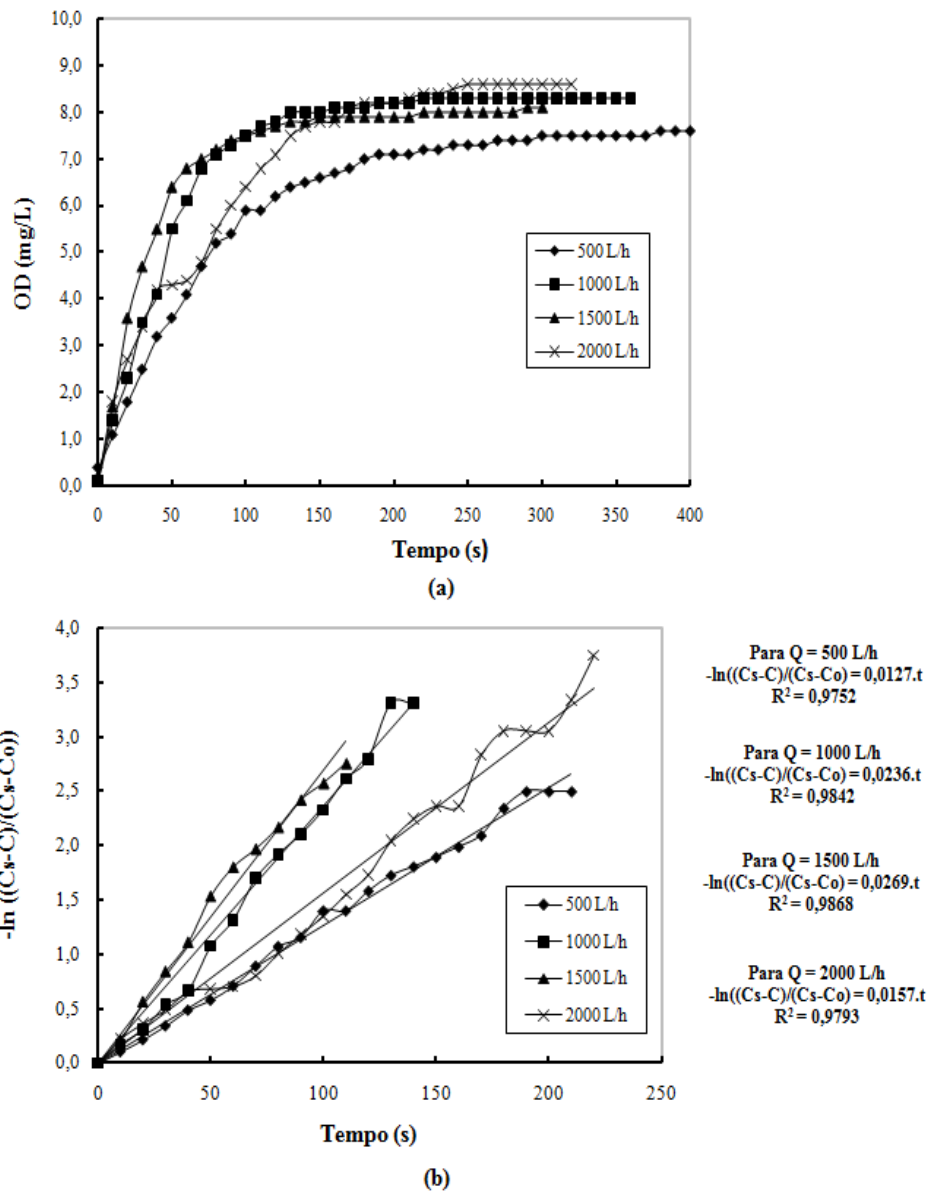
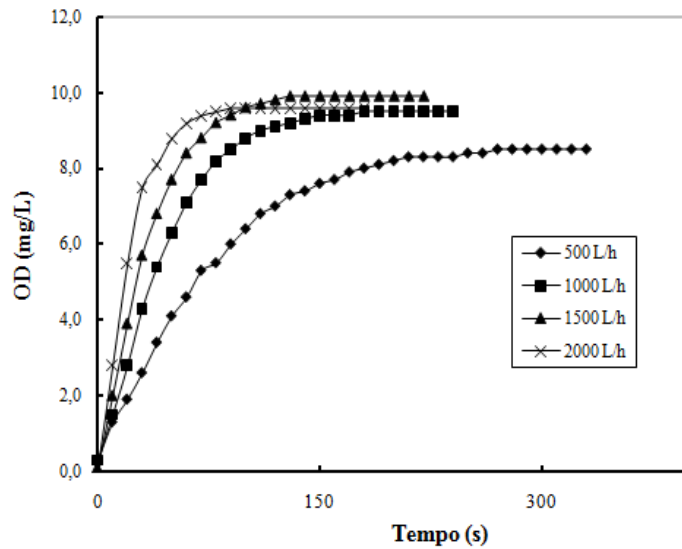


Figura 5 – Estudo de transferência de massa global $K_L a$ para o nível líquido $h = 3,0$ m, variando a vazão de 500 L/h até 2000 L/h, sendo: (a) evolução da concentração de OD em função do tempo para todas as vazões analisadas; (b) linearização da equação de absorção de oxigênio para obtenção dos valores de $K_L a$ e R^2 (coeficiente de determinação - para verificar o bom ajuste dos dados medidos e estimados).

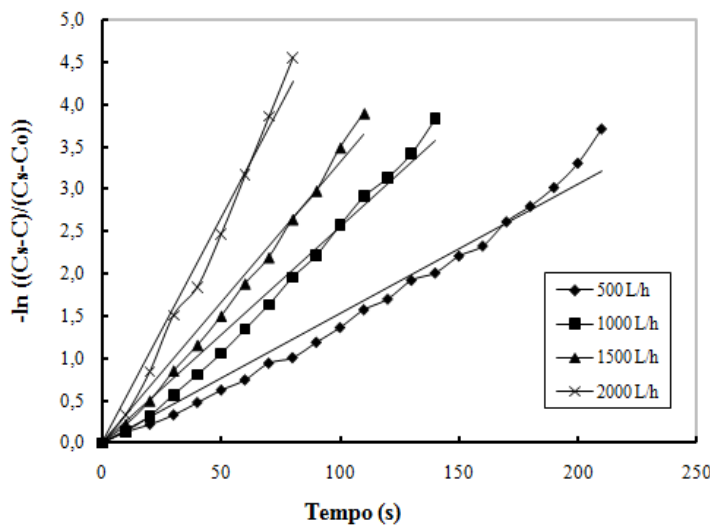
- Nível líquido $h = 4,0$ m

A Figura 6a apresenta a evolução da concentração de oxigênio dissolvido ao longo do tempo para as vazões estudadas, evidenciando que a saturação de OD do meio líquido é alcançada mais rapidamente para as maiores vazões.

O aumento do $K_L a$ é diretamente proporcional ao aumento da vazão de gás afluente, resultando em $0,0153 \text{ s}^{-1}$, $0,0256 \text{ s}^{-1}$, $0,0332 \text{ s}^{-1}$ e $0,0533 \text{ s}^{-1}$, respectivamente, para vazão de 500 L/h, 1000 L/h, 1500 L/h e 2000 L/h, conforme Figura 6b. A influência da coalescência não foi observada para este nível líquido. Além disso, a tendência das curvas exponenciais observadas na Figura 6a ilustra que não houve aderência das bolhas na sonda do medidor portátil de OD utilizado.



(a)



(b)

Para $Q = 500 \text{ L/h}$
 $-\ln((C_s-C)/(C_s-C_o)) = 0,0153.t$
 $R^2 = 0,9752$

Para $Q = 1000 \text{ L/h}$
 $-\ln((C_s-C)/(C_s-C_o)) = 0,0256.t$
 $R^2 = 0,9842$

Para $Q = 1500 \text{ L/h}$
 $-\ln((C_s-C)/(C_s-C_o)) = 0,0332.t$
 $R^2 = 0,9868$

Para $Q = 2000 \text{ L/h}$
 $-\ln((C_s-C)/(C_s-C_o)) = 0,0533.t$
 $R^2 = 0,984$

Figura 6 – Estudo de transferência de massa global $K_L a$ para o nível líquido $h = 4,0 \text{ m}$, variando a vazão de 500 L/h até 2000 L/h , sendo: (a) evolução da concentração de OD em função do tempo para todas as vazões analisadas; (b) linearização da equação de absorção de oxigênio para obtenção dos valores de $K_L a$ e R^2 (coeficiente de determinação - para verificar o bom ajuste dos dados medidos e estimados).

Variação do coeficiente de transferência de massa em função da vazão

Os resultados apresentados anteriormente, para as diversas vazões e níveis líquidos estudados, estão agrupados em uma única planilha, conforme ilustrado na Tabela 2. Utilizou-se a equação (4) para o ajuste do coeficiente de transferência de massa global $K_L a$ para a temperatura ambiente de 20°C . Uma análise simples na Tabela 2 mostra que houve interferências das coalescências apenas nos níveis líquidos $1,5 \text{ m}$ e $3,0 \text{ m}$, para a vazão de 2000 L/h .

Tabela 2 – K_{La} medido e $K_{La(20)}$ obtidos para as diversas vazões e níveis líquidos estudados.

Nível líquido (m)	Vazão (L/h)	Temperatura (°C)	K_{La} medido (s^{-1})	$K_{La(20)}$ (s^{-1})
1,0	500	26,6	0,0029	0,0026
	1000	27,0	0,0190	0,0171
	1500	27,7	0,0405	0,0361
	2000	28,2	0,0436	0,0385
1,5	500	29,0	0,0045	0,0039
	1000	27,7	0,0092	0,0082
	1500	27,8	0,0279	0,0248
	2000	27,0	0,0251	0,0226
2,0	500	27,0	0,0044	0,0039
	1000	26,0	0,0213	0,0194
	1500	27,6	0,0242	0,0216
	2000	28,2	0,0260	0,0230
3,0	500	26,7	0,0153	0,0138
	1000	27,0	0,0256	0,0230
	1500	27,7	0,0332	0,0296
	2000	25,9	0,0157	0,0143
4,0	500	25,3	0,0153	0,0141
	1000	24,4	0,0256	0,0239
	1500	24,4	0,0332	0,0310
	2000	25,2	0,0533	0,0493

Objetivando o melhor entendimento da evolução de K_{La} com a vazão de aeração, a Figura 7 ilustra $K_{La(20)}$ em função da vazão para os níveis líquidos estudados, observando-se que existe uma mesma tendência de acréscimo do K_{La} para todos os níveis líquidos estudados até a vazão de 1500 L/h. Para a vazão de 2000 L/h, independente do nível líquido, esta tendência de acréscimo é quebrada, evidenciando as interferências reais das coalescências.

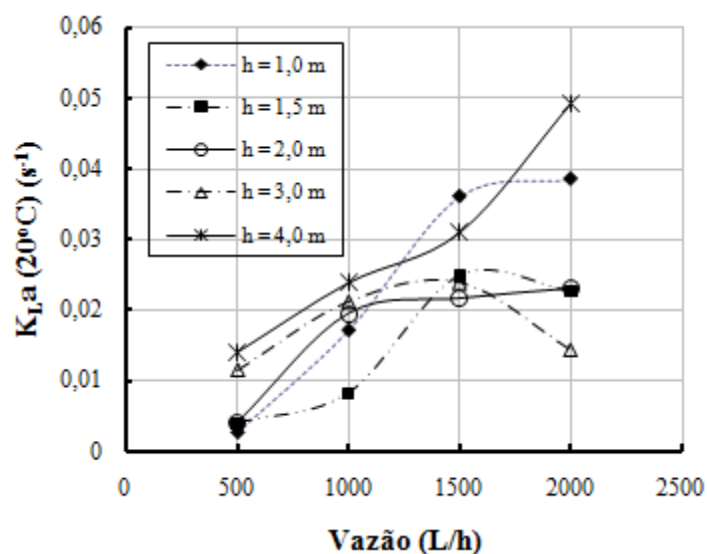


Figura 7 – Valores de $K_{La(20)}$ em função da vazão para os níveis líquidos estudados.

Foi realizada uma comparação dos resultados aqui obtidos com Salla (2002), o qual trabalhou com o mesmo tipo de difusor microporoso, as mesmas vazões, nível líquido de 0,5 m até 1,8 m e

coluna de aeração com seção transversal quadrada de 0,19 m de lado. De acordo com Salla (2002), para níveis líquidos entre 1,4 m e 1,8 m, o coeficiente de transferência de massa global K_{La} variou entre $0,25 \text{ min}^{-1} - 0,60 \text{ min}^{-1}$. Neste artigo, para este mesmo intervalo de nível líquido, obteve-se $K_{La(20)}$ entre $0,0026 \text{ s}^{-1} - 0,0493 \text{ s}^{-1}$, conforme observado na Tabela 2. Os maiores valores obtidos para este artigo está fundamentado na menor área transversal da coluna. Enquanto que Salla (2002) trabalhou com uma coluna de $0,0361 \text{ m}^2$ de área transversal, aqui trabalhou-se com $0,00785 \text{ m}^2$ de área transversal, resultando em um volume de coluna aproximadamente 4,60 vezes menor, logicamente para o mesmo nível líquido. Considerando-se a mesma área interfacial de contato gás-líquido, o menor volume líquido possibilita uma melhor eficiência de transferência de massa, lembrando que o termo a do coeficiente K_{La} refere-se à relação entre a área interfacial de contato e o volume líquido na coluna.

A mesma tendência de acréscimo do K_{La} para todos os níveis líquidos estudados até a vazão de 1500 L/h, observada na Figura 7, permitiu que fosse ajustada uma equação potencial que relaciona K_{La} com a vazão de aeração. Para isso, para cada vazão de aeração, determinou-se um coeficiente K_{La} médio para todos os níveis líquidos, conforme ilustrado na Figura 8. Na seqüência, utilizando a ferramenta *Solver* do Excel, ajustou-se os parâmetros a e b da equação potencial $K_{La} = a.Q^b$, utilizando a minimização dos mínimos quadrados entre os dados médios medidos e os estimados. A equação final resultou em $K_{La} (\text{s}^{-1}) = 5,3.10^{-5}.Q^{0,84}$, sendo a vazão Q em L/h. Esta equação pode ser utilizada em trabalhos que utilizam colunas de aeração com configurações similares à esta e neste intervalo de vazão. A Tabela 3 ilustra a somatória dos mínimos quadrados entre dados medidos e estimados.

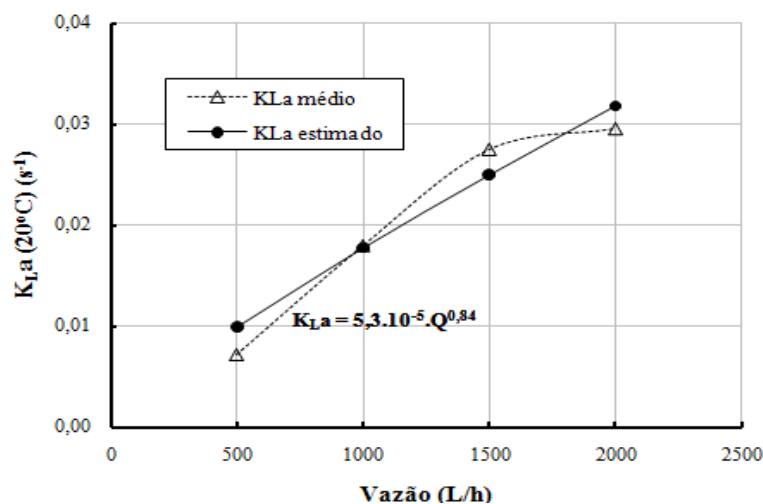


Figura 8 – $K_{La(20)}$ médio e K_{La} estimado em função da vazão.

Tabela 3 – Somatória dos mínimos quadrados entre dados de $K_L a$ medidos e estimados.

Q (L/h)	X	Y	(X - Y) ²	
500	0,0077	0,0099	4,93E-06	
1000	0,0184	0,0178	3,52E-07	X é $K_L a_{(20)}$ médio em s^{-1}
1500	0,0287	0,0250	1,34E-05	Y é $K_L a$ estimado em s^{-1}
2000	0,0296	0,0318	5,08E-06	
		Σ	2,37E-05	

Eficiência de transferência de massa de oxigênio

Utilizou-se a equação (6) para o cálculo da eficiência de transferência de massa de oxigênio. A Figura 9 ilustra a eficiência de transferência de oxigênio (% massa) em função da vazão de aeração (L/h), utilizando os 5 (cinco) níveis líquidos na coluna. Fica claro que a máxima eficiência é alcançada para a vazão de 1000 L/h e nível líquido de 3,0 m.

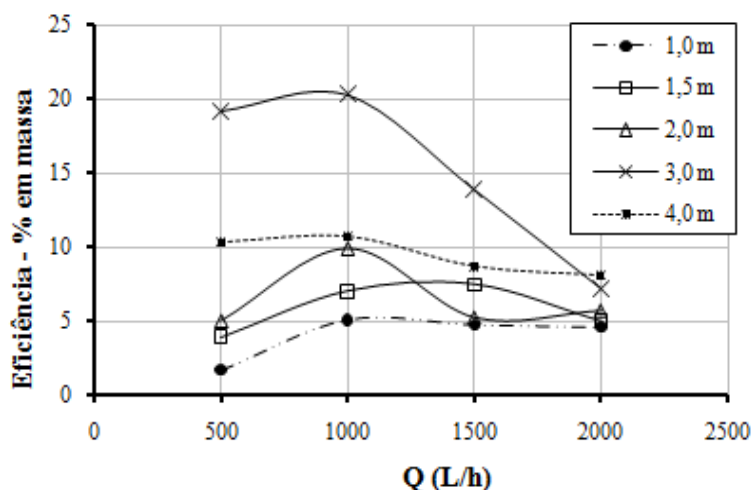


Figura 9 – Eficiência de transferência de oxigênio (% massa) em função da vazão de aeração (L/h), utilizando os 5 (cinco) níveis de água na coluna.

Uma análise comparativa com os resultados obtidos por Salla (2002) e Innocentini (1996) foi realizada. Antes da comparação é preciso informar as configurações experimentais para os trabalhos realizados por estes dois pesquisadores. Como já informado anteriormente neste artigo, Salla (2002) trabalhou com uma coluna de aeração de seção transversal quadrada de 0,19 m de lado, nível líquido entre 0,5 m até 1,8 m, vazão de aeração entre 400 L/h e 2000 L/h e utilizando água limpa, ou seja, sem a presença de matéria orgânica. Já Innocentini (1996) trabalhou com um reator de seção transversal quadrada de lado 0,6 m, vazão de aeração entre 800 L/h e 1800 L/h, nível líquido entre 0,5 m até 1,5 m e utilizando também água limpa.

Independente do nível líquido estudado, tanto os resultados de eficiência aqui obtidos quanto os resultados obtidos por Salla (2002) e Innocentini (1996), mostram que vazão de aeração próxima

a 1000 L/h gera maior eficiência de transferência de massa de oxigênio, evidenciando a importância das coalescências das bolhas no processo de transferência de massa.

Agora, para os níveis líquidos de 1,0 m e 1,5 m, as comparações da eficiência de transferência de massa apontam valores de eficiência de 0,4% - 2,2%, 0,2% - 0,7% e 2% - 7,5%, respectivamente, para o trabalho realizado por Salla (2002), Innocentini (1996) e o presente artigo (Figura 9). As diferenças obtidas nos três estudos podem ser explicadas pelas diferenças de volumes líquidos estudados, mostrando que o aumento do volume líquido é inversamente proporcional à eficiência de transferência de massa.

CONCLUSÕES

Neste artigo foi possível estudar a transferência de massa de ar na água para as bolhas geradas por um difusor de ar microporoso, em diversos níveis líquidos e diversas vazões de aeração, para o aparato experimental aqui adotado.

Os resultados obtidos geraram uma equação potencial que relaciona o coeficiente de transferência de massa global $K_L a$ com a vazão de aeração, podendo esta equação ser utilizada em trabalhos que utilizam colunas de aeração com configurações similares à esta e para o intervalo de vazão estudado.

Uma análise comparativa com outros trabalhos encontrados na literatura da área mostra que existe um região restrita nos intervalos de vazões estudados que gera maior eficiência de transferência de massa de oxigênio, evidenciando a importância das coalescências das bolhas no processo de transferência de massa. Também, nesta comparação, as diferenças nas eficiências de transferência de massa estão relacionadas com as diferenças de volumes líquidos estudados, mostrando que o aumento do volume líquido é inversamente proporcional à eficiência de transferência de massa.

BIBLIOGRAFIA

a) Livro

BRAGA, B. et al. (2005). *“Introdução à Engenharia Ambiental”*. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005, 320 p.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C.A.(2005). *“Tratamento de Esgotos Domésticos”*. Rio de Janeiro, 932p.

SCHULZ, H.E. (2003). *“O Essencial em Fenômenos de Transporte”*. EESC/USP São Carlos- SP, 382 p.

VON SPERLING, M. (2005). *“Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos”*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 452p.

b) Artigo em revista

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (1984). ASCE STANDARD – *“Measurement of oxygen transfer in clean water”*, p. 39.

GULLIVER, J.S.; RINDELS, A.J. (1993). *“Measurement of air-water oxygen transfer at hydraulic structures”*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 119, n° 3, p. 327-349.

c) Dissertações e Teses

INNOCENTINI, C.K.Z. (1996). *“Estudo da transferência de oxigênio da fase gasosa para a fase líquida usando difusor cerâmico poroso”*. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 86p.

MOMESSO, A.M. (1996). *“Absorção e dessorção de gases através da interface ar-água em sistemas de agitação mecânica”*. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 145p.

SALLA, M. R. (2002). *“Bases hidrodinâmicas para processos de transferência de gases em colunas com difusores”*. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 154p.

SCHULZ, H.E. (1989). *“Investigação do mecanismo de reoxigenação da água em escoamento e sua correlação com o nível de turbulência junto à superfície”*. São Carlos. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 516p.