

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/273315014>

# Estudo da Transferência de Gases em Coluna de Aeração Objetivando o Reuso em Águas Residuárias

Conference Paper · November 2003

---

READS

28

5 authors, including:



[Harry Edmar Schulz](#)

University of São Paulo

**211** PUBLICATIONS **192** CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Johannes G. Janzen](#)

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

**29** PUBLICATIONS **51** CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Luiz Daniel](#)

University of São Paulo

**38** PUBLICATIONS **135** CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

## ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE GASES EM COLUNA DE AERAÇÃO OBJETIVANDO O REUSO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Marcio Ricardo Salla<sup>1</sup>; Harry Edmar Schulz<sup>2</sup>; Guilherme de Lima<sup>3</sup>; Johannes Gérson Janzen<sup>4</sup> &  
Luiz Antônio Daniel

**Resumo** - Este trabalho é um estudo da transferência de oxigênio de bolhas de ar para a água, geradas por um difusor de ar, em uma coluna com seção transversal de 0,19m x 0,19m e 2,00m de altura. Variando a vazão do ar de 400 l/h a 2000 l/h e o nível de água de 0,50m a 1,80m, conclui-se que uma vazão entre 600 l/h e 800 l/h e nível de água de 1,80m apresenta maior eficiência de transferência de massa. Para verificar previsões do coeficiente de aeração de literatura, características hidrodinâmicas foram medidas, como as velocidades das bolhas e seu diâmetro equivalente, utilizando equipamento Laser para velocimetria não-intrusiva.

**Abstract** - This is a study about oxygen transfer between air bubbles and water, generated by a diffuser of air, using a column with cross section of 0,19 x 0,19 m and a height of 2,00 m. By changing the air flow from 400 L/h to 2000 L/h and the water level from 0,50m to 1,80m, it was concluded that an air flow between 600 L/h and 800 L/h and a level of water of 1,80m correspond to the best combination to increase efficiency in this equipment. To check predictions for the mass transfer coefficient found in literature, hydrodynamic characteristics were measured, like the velocity of the air bubbles and their equivalent diameter, using a laser equipment for non-intrusive velocimetry.

**Palavras-chave** - Transferência de gases em interfaces, velocimetria a laser, difusor

---

<sup>1</sup> Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Programa do Departamento de Hidráulica e Saneamento. Rua Ferdinando Biagioni, 1662 – Santa Angelina. CEP. 14802-170, Araraquara – SP – Brasil. Tel.(016) 236-2940. Fax.: (016) 273-9550. E-mail: marsalla@sc.usp.br

<sup>2</sup> Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Professor Titular do Departamento de Hidráulica e Saneamento. Avenida Trabalhador São Carlense, 400 – CEP. 13560-970, São Carlos – SP – Brasil. Tel.: (016) 273-9570.. Fax: (016) 273-9550. E-mail: heschulz@sc.usp.br

<sup>3</sup> Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Programa do Departamento de Hidráulica e Saneamento. Avenida Trabalhador São Carlense, 400 – CEP. 13560-970, São Carlos – SP – Brasil. Tel.: (016) 273-9552. Fax: (016) 273-9550. E-mail: gui\_lima@uol.com.br

<sup>4</sup> Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Programa do Departamento de Hidráulica e Saneamento. Avenida Trabalhador São Carlense, 400 – CEP. 13560-970, São Carlos – SP – Brasil. Tel.: (016) 273-9552. Fax: (016) 273-9550. E-mail: jgerosnj@gmx.net

## INTRODUÇÃO

A autodepuração dos rios tem sido insuficiente para eliminar poluentes lançados na água. Dentre os poluentes, os esgotos domésticos contém geralmente matéria orgânica. O consumo dessa matéria orgânica é feito por microorganismos, cuja sobrevivência depende do oxigênio dissolvido presente na água. Uma concentração baixa de oxigênio implica em um número reduzido de microorganismos, diminuindo a capacidade de eliminação de matéria orgânica presente no rio. Esta realidade impõe a necessidade de outros meios de aeração, capazes de suprir as necessidades de oxigênio para a redução da matéria orgânica. Alguns métodos para aeração são citados, como: processos de agitação mecânica com hélices ou turbinas (NEDER,1994 apud INNOCENTINI, 1996), bolhas ascensionais emitidas por difusores de ar (SHIAU,1995 apud INNOCENTINI, 1996), estruturas hidráulicas de reservatórios e rios, tais como ressalto hidráulico e queda livre de água (GULLIVER & RINDELS, 1993).

### Absorção de Gases pela Água: Definição de Parâmetros

Define-se o coeficiente de transferência de oxigênio,  $K_L a$ , como o parâmetro que determina a eficiência da absorção do oxigênio pela água.  $K_L a$  é definido pela equação:

$$C = C_s - (C_s - C_0)e^{-K_L a \cdot t} \quad (1)$$

$C$  = concentração do gás dissolvido no líquido em um determinado tempo,  $[M/L^3]$ ;  $C_s$  = concentração de saturação do líquido,  $[M/L^3]$ ;  $C_0$  = concentração do gás dissolvido para  $t=0$ ;  $K_L a$  = coeficiente de transferência de massa global,  $[t^{-1}]$ ;  $t$  = tempo,  $[t]$ .

Uma vez que o oxigênio é um gás pouco solúvel em água, o controle da absorção desse gás ocorre na fase líquida, sendo  $K_L a$  calculado a partir das características existentes nessa fase.

### Aeração por Bolhas de Ar

Na aeração por bolhas de ar procura-se gerar grande quantidade de bolhas de diâmetro reduzido, o que é conseguido com difusores cerâmicos, plásticos ou de metais, que têm poros muito finos. Contudo, o tamanho com que as bolhas de gás entram em uma coluna e sobem por ela é função também de outros parâmetros além do diâmetro do poro, como a vazão de gás que entra na coluna através do difusor e a turbulência existente na coluna, entre outros.

Hoje atingem-se diâmetros de bolhas, de oxigênio e de ar, em torno de 2,0 a 5,0 mm. A literatura sugere que ainda serão obtidos diâmetros de 0,3 a 1,0 mm, que aumentarão a eficiência na oxigenação do líquido. Otimizar tamanho de bolhas com a profundidade de injeção é buscar a situação na qual as bolhas chegam à superfície livres de oxigênio. Bolhas grandes têm área superficial pequena e chegam rápido à superfície, sem tempo para o oxigênio ser transferido à água. Bolhas muito pequenas "perdem" o oxigênio no início da ascensão, sendo impróprio para grandes profundidades. (MOTARJEMI & JAMESON, 1978). Com os difusores atuais (diâmetro de bolha = 2,0 mm), transferir 95% do oxigênio implica ter colunas com alturas superiores a 10,0 m, inviáveis financeiramente e operacionalmente.

### **Velocidade Ascensional das Bolhas**

A velocidade ascensional das bolhas é relevante no cálculo de  $K_L a$ , mas há diferença entre a velocidade de uma bolha e de muitas bolhas. Para muitas bolhas a velocidade costuma ser menor devido a:

- aglomerado de bolhas apresenta maior resistência ao deslocamento;
- diâmetro das bolhas pode ser alterado em decorrência da turbulência que é gerada no líquido pela ação do aglomerado, podendo causar quebras e coalescência de bolhas.

HABERMAN et al.(1954) estudaram a velocidade de bolhas isoladas em função do seu diâmetro para vários líquidos. Bolhas com diâmetro  $2,0\text{ mm} < d < 10,0\text{ mm}$ , em água, apresentam, segundo os autores mencionados, velocidade terminal isolada entre  $20,0\text{ cm/s} < v < 30,0\text{ cm/s}$ .

### **Área Interfacial das bolhas**

Um dos principais parâmetros na transferência de massa é a área interfacial das bolhas em contato com o líquido. Quanto maior é a área interfacial, maior é a transferência de massa de gás. Para um mesmo volume de ar (vazão constante na coluna), quanto menor é o diâmetro das bolhas, maior é a sua quantidade e a área interfacial de contato. Justifica-se assim a busca de bolhas menores.

O transporte de massa é prejudicado por impurezas aderidas nas superfícies das bolhas, que diminuem a área de troca (HAMMERTON & GARNER, 1954, apud MEIJBOOM & VOGTLÄNDER (1974) e MOTARJEMI & JAMESON (1978). Bolhas maiores têm poucas impurezas aderidas, devido à mobilidade. Bolhas menores que  $50\ \mu\text{m}$  têm aderência maior. (MOTARJEMI & JAMESON, 1978).

## Coalescência e Separação de Bolhas

Segundo CALDERBANK (1964) apud OTAKE et. al. (1977), a ocorrência de coalescência e separação de bolhas depende das condições de operação, tais como vazão de aeração no difusor, altura da coluna, além das propriedades dos líquidos, como viscosidade, densidade e tensão superficial. Na aeração por bolhas de ar, coalescência e separação são relevantes para a velocidade ascensional, a distribuição dos tamanhos de bolhas e a quantificação da sua área interfacial. A coalescência diminui a área interfacial de transferência de massa para um mesmo volume de gás. Espera-se, portanto, diminuição no valor do coeficiente de transferência de massa (OTAKE, TONE, NAKAO & MITSUHASHI, 1976). Também ZIEMINSKI & HILL et al.(1962), ZIEMINSKI et al. (1967), e ZIEMINSKI & LESSARD et al. (1969) apud ZIEMINSKI & WHITTEMORE (1970) comentam sobre a mudança da área de bolhas, causada por coalescência na zona de formação imediatamente acima do difusor.

## Coeficiente de Transferência de Massa

Em muitos processos de transferência de massa entre gás e líquido úteis nos estudos ambientais e nas engenharias, a fase líquida governa a transferência global, como no caso do oxigênio, podendo-se desconsiderar a influência da fase gasosa. (TREYBAL, 1980 e PERRY et al., 1984). Segundo o modelo de FRÖSSLING (apud MOTARJEMI & JAMESON, 1978), o coeficiente de transferência de massa,  $K_L$ , para bolhas muito pequenas e consideradas sólidas, é dado por:

$$Sh = 0.6 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (2)$$

$Sh$  é o número de Sherwood, [-];  $Re$  é o número de Reynolds, [-];  $Sc = \mu_L / \rho_L D_L$  é o número de Schmidt, [-]. MEIJBOOM & VOGTLÄNDER (1974) mencionam ser adequado haver isolamento térmico na coluna. De acordo com a ASCE STANDARD-1984 (American Society of Civil Engineers), a temperatura da água, para realizar o processo de transferência de massa, deve estar entre 10°C e 30°C. Em todos os ensaios aqui realizados a temperatura esteve nesse intervalo, com diferença entre o início e o final de cada ensaio nunca maior do que 2°C, também estipulada pela ASCE STANDARD-1984.

Recomenda-se uma correção da temperatura, utilizando um fator de correção  $\theta$  (aceito pela ASCE, 1984) para normalizar os resultados. O fator de correção sugerido pela ASCE STANDARD

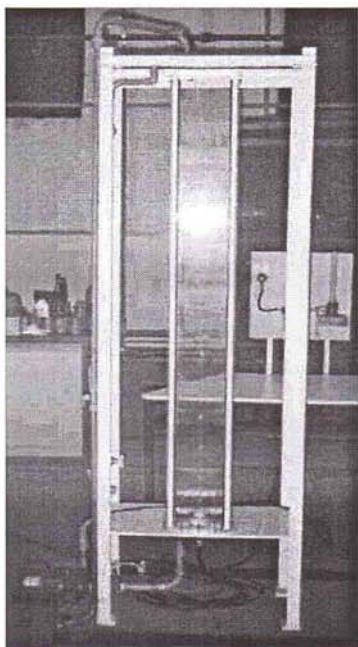
é 1.024. A equação sugerida e citada em PERRY et al. (1984), KRENKEL et al. (1962), é a seguinte:

$$K_L a_{20} = K_L a \theta^{(20-T)} \quad (3)$$

$K_L a$  é o coeficiente de transferência de massa global não corrigido,  $[1/s]$ ;  $K_L a_{20}$  é o coeficiente de transferência de massa global corrigido a  $20^\circ\text{C}$ ,  $[1/s]$ ;  $\theta$  é o fator de correção; e  $T$  é a temperatura obtida no ensaio que precisa ser ajustada, em Celsius.

## MATERIAIS

### Coluna



**Figura 1** - Coluna de aeração

A coluna utilizada tem seção transversal quadrada de 19cm x 19cm e 2.00m de altura, com 2 faces paralelas de acrílico e 2 faces paralelas de vidro, ambas com espessura de 1.50cm, juntamente com fundo de acrílico de mesma espessura, conforme a Figura 1. As faces de acrílico facilitam a perfuração das tomadas de água e demais trabalhos mecânicos. Em 1970, ZIEMINSKI & WHITTEMORE adaptaram uma montagem experimental com uma placa plana de vidro, para obter imagens não distorcidas. No presente trabalho optou-se montar toda a coluna com base quadrada e placas planas, para as quais foi providenciado travamento adequado.

A base é provida de um difusor poroso localizado no seu centro e uma abertura para saída de água (esvaziamento da coluna ou recirculação da água para deaeração). A base da coluna pode ser substituída, permitindo estudar vários tipos de difusores diferentes.

O equipamento utilizado neste trabalho para geração de bolhas ascensionais foi um difusor de ar nacional confeccionado em plástico microporoso, com poros de  $20\mu\text{m}$ , para vazão de ar até  $3\text{ m}^3/\text{h}$ , 75mm de diâmetro em sua base e 70mm de altura.

Antes do gás vindo do compressor entrar no aerador, o mesmo passa por um redutor de pressão. Após o redutor, o gás é filtrado com a finalidade de impedir o entupimento do difusor. Na saída do filtro, o ar passa pelo medidor de vazão de ar (rotâmetro), graduado de 200 l/h até 2000 l/h. Foi possível fixar com precisão a vazão de ar desejada para cada ensaio.

### **Aparelho Medidor de O.D. (Oxigênio Dissolvido)**

Segundo a ASCE STANDARD, medidas de concentração de oxigênio em águas limpas ou de abastecimento público usam sonda tipo eletrodo de membrana ou o Método de Winkler. Neste trabalho usou-se o aparelho medidor de oxigênio dissolvido WTW -323, que consiste de um eletrodo ligado a um sistema de amplificação de sinal. O eletrodo é separado do líquido por uma membrana permeável ao oxigênio. Quando a sonda está em contato com o líquido, o oxigênio dissolvido 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, A.M– 1996).

### **Laser**

As velocidades ascensionais das bolhas e o diâmetro equivalente foram obtidos através da Velocimetria a Laser por Processamento de Imagens (VLPI). A VLPI possibilita a obtenção de campos instantâneos de velocidades em uma região bidimensional do escoamento. Nessa técnica, uma folha de Laser expandida por um conjunto de lentes ilumina o escoamento. Com câmeras de alta resolução, as imagens de partículas que se deslocam na área de estudo são gravadas. O laser é adequado devido a sua luz altamente concentrada. As partículas presentes no meio refletem esta luz com intensidade suficiente para serem registradas em equipamentos óticos, como câmeras fotográficas e filmadoras.

Os componentes principais da velocimetria a Laser por processamento de imagens (VLPI) são:

### **Fonte de Laser**

Foi utilizado um Laser de vapor de cobre. As potências médias na saída do feixe estão entre 10 e 20 *W*, com uma taxa de repetição de pulsos de 10 *kHz*, com duração do pulso entre 20 e 60 *ns*.

### **Gerador do Plano de luz**

Conjunto de lentes convergentes e divergentes, que tem a finalidade de gerar um plano de luz. A espessura da folha de luz Laser é de aproximadamente 4mm, com um ângulo de abertura de 28°.

### **Câmera CCD**

A câmera capta as imagens na área selecionada do escoamento, iluminada pelo plano de luz laser. A câmera utilizada neste trabalho tem uma resolução que varia de 512 x 512 a 1K x 1K pixels.

### **Processamento das imagens**

As imagens obtidas através da câmera são trabalhadas com o programa VISIFLOW®, adquirido para este estudo, objetivando a determinação dos campos de velocidades ascensionais das bolhas.

## **METODOLOGIA EMPREGADA**

### **Deaeração**

Antes da aeração é preciso retirar o máximo possível de oxigênio dissolvido da água. Denomina-se esta operação de "deaeração". Neste trabalho usou-se o método químico do sulfito de sódio anidro, que pode gerar interferências na determinação do oxigênio dissolvido, devido à presença de agentes químicos. Contudo, procedimentos consagrados para análise de aeração (ASCE STANDARD, 1984, por exemplo), sugerem este método. Apesar dos possíveis inconvenientes, a deaeração total é atingida em apenas 3 a 4 minutos (ASCE STANDARD). Ou seja, chega-se à concentração  $C_{O_2}=0,0$  mg/L.

Na deaeração da coluna usou-se o sulfito de sódio anidro ( $Na_2SO_3$ ) na proporção 0,42g/L. Para a mistura do composto em toda a coluna foi utilizada uma bomba de 1/3 cv para circular a água. Para isolar a coluna do ar atmosférico na deaeração usou-se uma tampa de acrílico. Esta tampa era retirada quando o experimento de aeração tinha início.

### **Aeração**

O gás utilizado para a realização de todos os ensaios foi fornecido através de um compressor de ar. Após a passagem pelo rotâmetro, o ar entra no difusor microporoso, que gera as bolhas de ar ascensionais, necessárias para a execução dos ensaios. A sonda do medidor de O<sub>2</sub> era posicionada a 2 cm da base da coluna, ficando ao lado do difusor (em decorrência da grande quantidade de bolhas, que podiam se fixar à membrana porosa, invalidando os experimentos).

### **Diâmetro Equivalente das Bolhas**

Para determinar o diâmetro equivalente das bolhas utilizou-se uma folha de luz Laser. Uma escala, graduada na abscissa e na ordenada, foi mergulhada na coluna, no interior dessa folha, para um nível de água de 1.80m. Calibrou-se a escala no programa Visiflow, permitindo a obtenção de



imagens com tamanhos de bolhas corretos. O tempo de exposição ajustado para a câmera foi de 0,1272 milissegundos, o que produzia traços para as bolhas mais velozes na região central. Para buscar um maior número de bolhas visíveis e sem traços, houve a necessidade de captar as imagens a 1,0cm de uma das paredes de vidro, devido às velocidades menores nesta região e menor concentração de bolhas.

As distâncias do sistema ótico (geração de folha de luz) e da câmera, com relação à parede externa da coluna, na determinação dos diâmetros, foram de 0,60 m e 0,51m, respectivamente. Foram determinados diâmetros equivalentes para todas as vazões usadas no estudo do coeficiente de transferência, mantendo-se o nível de água em 1,80 m. Para cada vazão foram tiradas 60 imagens com um intervalo de 0,1272 milissegundos de exposição. Em média conseguia-se visualizar 4 bolhas por imagem. Analisando cada foto com o programa *Paint* do *Windows*® determinou-se, com a precisão permitida pela régua graduada, os diâmetros equivalentes das bolhas. Buscou-se minimizar o erro com o uso de grande número de bolhas, medindo os diâmetros verticais (*a*) e horizontais (*b*). O valor do diâmetro equivalente é o de uma esfera com volume igual ao do elipsóide medido, onde  $D_e = (ab^2)^{1/3}$ .

### **Velocidade Ascensional das Bolhas**

Determinou-se o campo de velocidade para as mesmas vazões do estudo do coeficiente de transferência, mas mantendo o nível de água fixo em 1,80m. As imagens obtidas possibilitam visualizar toda a seção transversal do escoamento ascensional das bolhas.

O sistema ótico para geração do plano de luz e a câmera usados nas medidas das velocidade das bolhas estavam distantes 0,20 m e 0,48m da parede externa da coluna, respectivamente. O plano de luz Laser foi posicionado no plano central da coluna. As imagens forneceram os campos instantâneos de velocidade ascensional, bem como as velocidades das bolhas, através do programa VISIFLOW ®.

### **Ajuste dos Parâmetros: Coeficiente Volumétrico $K_L a$ de Transferência de Massa Global e Concentração de Saturação $C_s$**

Utilizou-se a equação (1) para ajustar os parâmetros  $C_s$  e  $K_L a$ , através de regressão não-linear das curvas de concentração com o tempo, executada com o programa MATHEMATICA 4 ®.  $C_0$  foi mantido zero em todos os ajustes, porque a concentração inicial ( $C_0$ ) foi de fato zerada quimicamente.

### **Estimativa da Área Superficial Total das Bolhas**

JUN & JAIN (1993) fornecem a equação 4 para o cálculo da área superficial total das bolhas:

$$A_b = \frac{Q_a}{V_a} \frac{S_m}{V_m} L \quad (4)$$

$A_b$  é a área superficial total das bolhas;  $Q_a$  é a vazão de ar;  $V_a$  é a velocidade média das bolhas de ar;  $S_m$  é a área superficial média de bolhas individuais;  $V_m$  é o volume médio de bolhas de ar individuais e  $L$  é a distância entre a saída do ar no difusor e o nível de água na coluna.  $L$  é obtido da geometria do sistema,  $Q_a$  é medido diretamente.  $S_m$  e  $V_m$  foram obtidos do tamanho das bolhas e  $V_a$  foi determinado com o uso do aparelho Laser e do programa próprio.

### **Eficiência de Transferência de Oxigênio na Água**

A avaliação da eficiência de transferência é geralmente o objetivo mais almejado em estudos deste tipo. O que define a eficiência de transferência de massa de oxigênio na água é a relação:

$$\eta = (\text{massa de } O_2 \text{ transferido}) / (\text{massa de } O_2 \text{ fornecido à coluna})$$

Segundo INNOCENTINI (1996), para aeração por bolhas de difusor poroso, a equação da eficiência de transferência de massa de oxigênio é:

$$\eta = \frac{(C_s - C_0) \cdot V_L}{Q \cdot X_{O_2} \cdot \rho_{ar} \cdot t_{aeração}} \quad (5)$$

$C_s$  = concentração de saturação do oxigênio na água, em  $mg/L$ ;  $C_0$  = concentração inicial de oxigênio dissolvido;  $V_L$  = volume de água na coluna, em litros;  $Q$  = vazão de aeração, em  $L/min$ ;  $X_{O_2}$  = fração mássica de oxigênio no ar atmosférico (0.209);  $\rho_{ar}$  = massa específica do ar atmosférico ( $1,0 \text{ kg}/m^3$ );  $t_{aeração}$  = tempo de aeração em cada ensaio, em minutos. Neste trabalho considerou-se o tempo de aeração como sendo o tempo em que a concentração de O.D. cresceu desde  $C_0 = 0$  ao valor de saturação, na precisão do aparelho (deve-se lembrar que o processo é assintótico).

### **Área Transversal das Bolhas**

A área transversal das bolhas é usada na velocidade teórica das bolhas (vazão de aeração dividida pela área transversal). Segundo SCHULZ (1989), na falta de outros dados, estima-se esta área como:

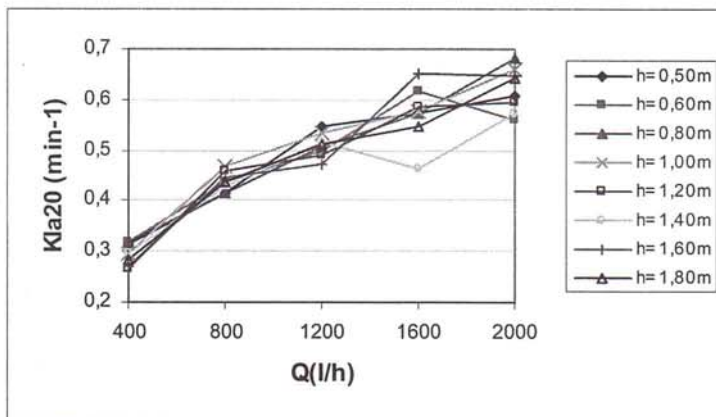
$$A_{\text{Transv. Bolhas}} = A_{\text{Transv. Total}} \frac{V_{\text{Expandido}}}{V_{\text{Líquido}}} \quad (6)$$

$A_{\text{Transv. Bolhas}}$  é a área transversal das bolhas,  $[L^2]$ ;  $A_{\text{Transv. Total}}$  é a área transversal da coluna, constante e igual a  $0,19\text{m} \times 0,19\text{m}$ ,  $[L^2]$ ;  $V_{\text{Expandido}}$  é o volume total das bolhas, igual a  $0,19\text{m} \times 0,19\text{m} \times h(\text{m})$ , onde  $h(\text{m})$  é a diferença do nível de água na coluna entre o difusor ligado e desligado,  $[L^3]$ ;  $V_{\text{Líquido}}$  é o volume líquido total na coluna com o difusor desligado,  $[L^3]$ .

## RESULTADOS

### Curvas de aeração

Foram realizados 40 ensaios para transferência de oxigênio, variando a vazão de ar no difusor e a altura da água na coluna. Os parâmetros  $K_L a$  e  $C_s$  foram ajustados às curvas de aeração com o programa MATHEMATICA 4 ®. A Figura 2 apresenta curvas de  $K_L a(20)$  em função das 5 vazões



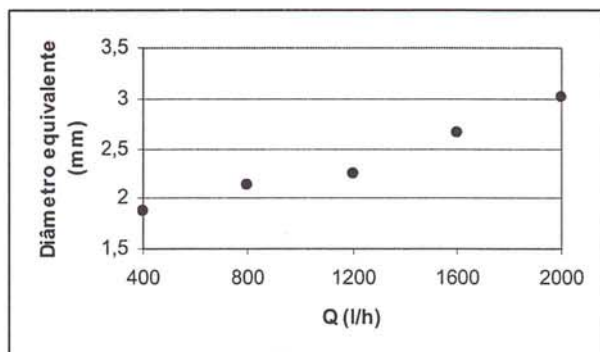
**Figura 2** – Curvas de  $K_L a(20) \times Q$  (l/h) para todos os níveis de água estudados

de ar estudadas e dos níveis de água na coluna. Todas as curvas são crescentes com a vazão de ar, para um mesmo nível de água. Para o nível de água de 1,40m, o coeficiente de transferência na vazão de 1.600 L/h fugiu do crescimento das demais curvas. Uma causa pode ser a contaminação da água neste experimento. Apesar disso, a qualidade das curvas é excelente.

### Diâmetro equivalente médio

O diâmetro equivalente médio foi obtido das fotografias digitais de cada vazão. Após analisadas todas as fotografias, computados os valores dos diâmetros verticais e horizontais e calculado o diâmetro equivalente de cada bolha, obtiveram-se valores médios desses diâmetros equivalentes em função da vazão de aeração (mantendo-se o nível de água na coluna em 1.80m). A posição onde foram feitas as imagens manteve-se igualmente constante, a 0.80m acima da base interna da coluna. A Figura 3 apresenta os resultados obtidos de forma gráfica. Como era esperado,

quanto maior a vazão de aeração, maior é o diâmetro equivalente médio das bolhas. Vale mencionar que, apesar da metodologia algo rudimentar para a obtenção dos diâmetros (que exige um grande número de medidas), o resultado obtido é bom, conforme mostra a Figura 3. Os valores médios apresentam pouco espalhamento em



**Figura 3** – Diâmetro equivalente (mm) x Q (l/h), mantendo o nível de água na coluna em 1,80m.

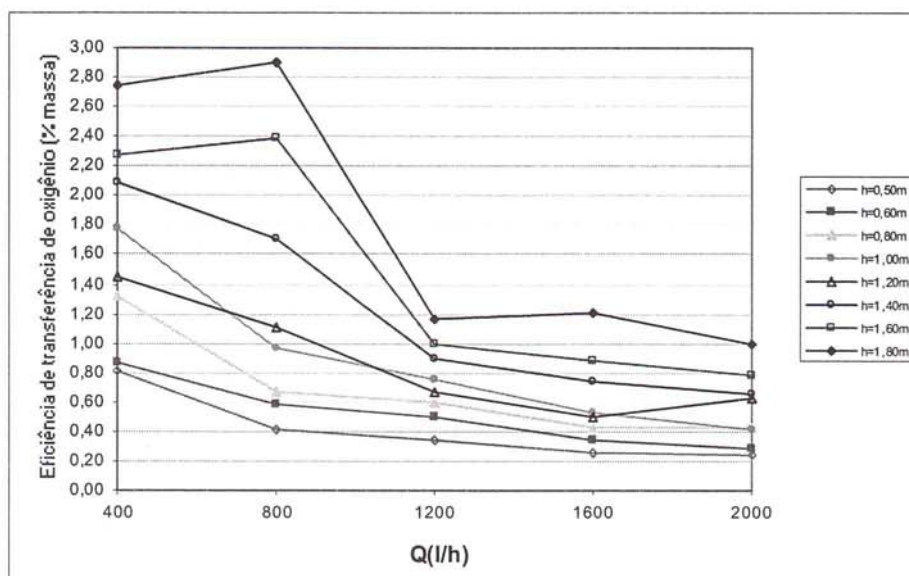
torno do crescimento aparente linear. Mencionam-se duas dificuldades na avaliação dos diâmetros equivalentes. A primeira dificuldade foi visualizar bolhas nítidas nas baixas vazões. Colocou-se então régua graduada interna à coluna para obter o tamanho das bolhas. A segunda dificuldade foi a operação de traçar linhas horizontais e verticais em torno de cada bolha, para obter o diâmetro. A tarefa exigiu cuidados extremos.

A literatura "proíbe" desconsiderar a influência da altura da coluna no diâmetro equivalente das bolhas. Assim, recomenda-se estudar esta questão em trabalhos futuros. A altura da coluna afeta o diâmetro das bolhas, pois afeta a pressão. Se a altura cresce, a pressão cresce, e o volume de uma bolha diminui aproximadamente com a relação  $pV = \text{constante}$ , onde  $p$  é a pressão e  $V$  é o volume.

### **Eficiência da transferência de massa de oxigênio para a água**

A eficiência da transferência de massa permite indicar a melhor situação "geométrica" para as diferentes configurações ensaiadas. O grande espectro de vazão e nível de água permitiu obter uma boa imagem final da evolução dessa eficiência, calculada pela equação (5). A Figura 4 mostra uma mesma tendência geral para todas as curvas, onde a eficiência decresce com o aumento da vazão de ar. Para uma mesma vazão, a eficiência aumenta com o aumento do nível de água na coluna.

Atentando agora aos detalhes das curvas, observa-se a existência de duas regiões: A primeira região envolve as profundidades de 0,50m a 1,00m, cujos dados estão na parte inferior da figura. As "curvas" apresentam-se decrescentes, sem ponto de inflexão próximo à vazão de 400 l/h. A segunda região envolve as profundidades de 1,20m a 1,80m, cujos dados estão na parte superior da figura. As "curvas" apresentam ponto de inflexão próximo à vazão de 400 l/h. As duas regiões ficam bem demarcadas pela sobreposição das curvas das profundidades de 1,00m e 1,20m, cada qual com sua tendência, porém ocupando o mesmo espaço da figura. A maior eficiência foi obtida para vazão de 800 L/h, com o nível de água de 1.80m. Infere-se que há um ponto de máximo para uma vazão entre 600 L/h e 800 L/h, nesta profundidade. O mesmo é observado na profundidade de 1,60m. A existência desse máximo sugere a realização de mais experimentos, buscando aumentar ainda mais a eficiência.

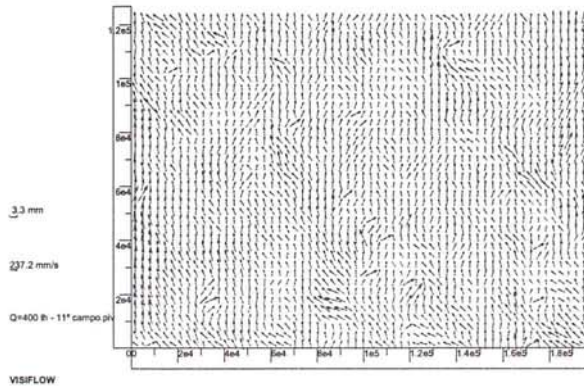


**Figura 4** – Eficiência de transferência de oxigênio (% massa) em função da vazão de aeração Q (l/h), utilizando vários níveis de água na coluna.

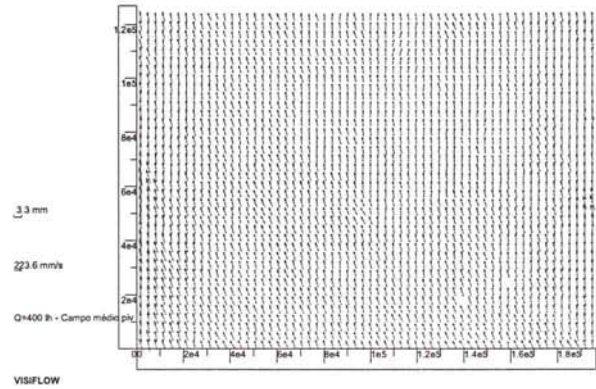
#### Campo de velocidade ascensional das bolhas

Campos instantâneos de velocidade ascensional (em número de 40) das bolhas foram obtidos para cada vazão estudada. As Figuras 5 e 6 mostram um campo instantâneo e o campo médio para vazão de 400 L/h, em uma região de 19cm x 12 cm localizada a 80cm acima da face interna da base, com nível de água de 1,80m. Após a obtenção dos campos instantâneos, foi determinado o campo médio para as 40 imagens de cada vazão, totalizando 5 campos médios de velocidade.

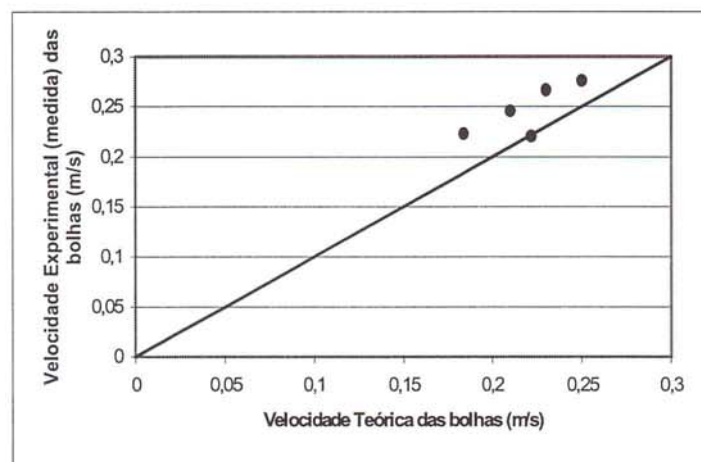
Os vetores resultantes dos campos médios são idealmente verticais. Na Figuras 6 (vazão de 400 l/h) mostra-se que nem todos os vetores médios são verticais. Assim, mais campos instantâneos podem ser convenientes para atingir a situação ideal. Mas, para obter a velocidade média de ascensão, usada no cálculo da área interfacial de troca da equação (4), e o coeficiente de transferência de massa teórico da equação (2), basta a componente  $y$  (vertical) dos vetores. De cada campo médio foram extraídos os valores da componente  $y$  de cada vetor e exportados para uma planilha eletrônica de cálculo. Achou-se o valor da velocidade média ascensional através da média aritmética dessas componentes  $y$ . Para comprovar os valores obtidos com a metodologia PIV, estes foram comparados com os valores teóricos de velocidade ascensional das bolhas. A velocidade média teórica é a divisão da vazão de ar aplicada pela área transversal das bolhas (equação (6)). A Figura 7 traz a comparação entre as velocidades teóricas e experimentais (velocimetria a Laser) para nível de água dentro da coluna em 1,80m.



**Figura 5** – Um dos campos de velocidade das bolhas instantâneo para a vazão de 400 l/h.



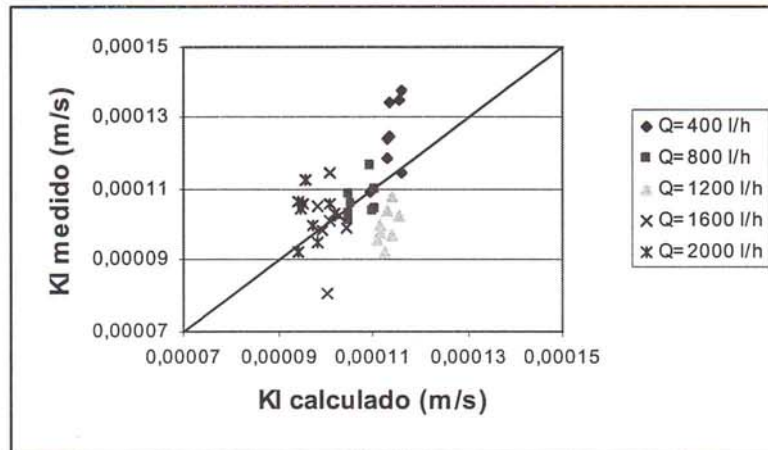
**Figura 6**– Campo médio de velocidade das bolhas para a vazão de 400 l/h



**Figura 7** – Comparação entre os valores de velocidade experimental (medida) das bolhas e a velocidade teórica das bolhas, para o nível de água dentro da coluna de 1,80m.

A Figura 7 mostra boa concordância entre valores teóricos e dados experimentais. A maior diferença observada foi da ordem de apenas 20%, um aspecto positivo desta comparação.

A comparação das previsões da equação (2) denominada de Modelo de FRÖSSLING, com os dados aqui medidos pode ser vista na Figura 8. Como pode ser observado nesta Figura os valores do coeficiente de transferência de massa medidos não seguem a tendência geral do modelo. Várias causas podem estar vinculadas a essa diferença. Por exemplo, um erro pode residir na consideração de que o diâmetro equivalente das bolhas e a velocidade ascensional é igual para todos os níveis de água na coluna, para uma mesma vazão. Contudo também o modelo pode apresentar limitações para a geometria estudada, não sendo adequado, eventualmente, para este tipo de aplicação. Apesar da falta de aderência comportamental, os valores numéricos são da mesma ordem de grandeza para os experimentos e para o modelo.



**Figura 8** – Comparação dos valores de KI (m/s) obtidos neste trabalho e aqueles do Modelo de FRÖSSLING (Equação 2).

## CONCLUSÕES

Avaliou-se o coeficiente de transferência de oxigênio para a água em diferentes condições de operação. Os resultados compõem um conjunto coerente, com gráficos elucidativos para comportamentos e tendências, que são claramente visíveis.

Foi possível verificar as conseqüências de alterações geométricas (volumes de ar presentes na coluna de líquido) e cinemáticas (vazões) na eficiência do equipamento.

A comparação realizada do coeficiente de transferência de massa medido neste trabalho com o Modelo de FRÖSSLING mostrou baixa correlação entre dados e previsão.

Foi possível avaliar o campo de velocidade ascensional com o uso de velocimetria a Laser. Os valores mostraram-se coerentes com previsões obtidas de aproximações teóricas.

Recomenda-se a continuidade dos estudos, buscando estabelecer metodologias seguras de quantificação do diâmetro das bolhas ascensionais. Adicionalmente, devem ser empreendidos esforços para estudar as situações que implicam em eficiência máxima de transferência de massa da fase gasosa para a fase líquida. Pode-se inferir que as situações aqui estudadas crescem muito em complexidade quando reações químicas estão presentes, como no caso da desinfecção de águas por ozonização.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pelos auxílios 00/13953-6, 99/12636-8, 99/12635-1, que permitiram conduzir esse trabalho, e pela bolsa 01/13586-6 concedida ao primeiro autor. Agradecem ainda ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico, CNPq, pelo auxílio 520540/00.0 e pela bolsa concedida ao primeiro autor na época em que estes experimentos foram realizados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (1984). ASCE STANDARD – *Measurement of oxygen transfer in clean water*, p. 39, July.
- 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, March.
- HABERMAN, W.L.; MORTON, R.K. (1954). An experimental study of bubbles moving in liquids. *American Society of Civil Engineers – Transactions*, n° 2799, p.227-252, January.
- INNOCENTINI, C.K.Z.(1996). *Estudo da transferência de oxigênio da fase gasosa para a fase líquida, usando difusor cerâmico poroso*. São Carlos. 87p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- JUN, K.S.; JAIN, S.C.(1993). *Oxygen transfer in bubbly turbulent- shear flow*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 119, n° 1, p. 21-36, January.
- KRENKEL, P.A.; ORLOB, G.T.(1962). *Turbulent diffusion and the reaeration coefficient*. Journal of the Sanitary Engineering Division, v. 88, n° SA2, p.53-83, March.
- MEIJBOOM, F.W.; VOGTLÄNDER, J.G. (1974). *A new method for measuring the transfer of oxygen in liquids. Measurements of oxygen transfer from bubbles in water and in water + 1-Butanol*. Chemical Engineering Science, v. 29, p. 799-803, August.
- MOMESSO, A.M. (1996). *Absorção e dessorção de gases através da interface ar-água em sistemas de agitação mecânica*. São Carlos. 145p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MOTARJEMI, M.; JAMESON, G.J.(1978). *Mass transfer from very small bubbles – The optimum bubble size for aeration*. Chemical Engineering Science, v. 33, p. 1415-1423, June.
- OTAKE, T.;TONE, S.; NAKAO, K.; MITSUHASHI, Y. (1977). *Coalescence and breakup of bubbles in liquids*. Chemical Engineering Science, v. 32, p. 377-383, August.
- PERRY, R.H.; GREEN, D.W. (1984). *Perry's Chemical Engineers – Handbook*, Sixth Edition, McGraw Hill, New York.
- 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. 516p. v2. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- TREYBAL, R.E.(1980). *Mass Transfer Operations*, Third Edition, McGraw-Hill Book Company, London.
- ZIEMINSKI, S.A.; WHITTEMORE, R.C.(1970). *Behavior of gas bubbles in aqueous electrolyte solutions*. Chemical Engineering Science, v. 26, p. 509-520, July.