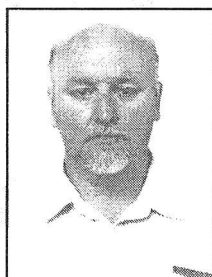


AVALIAÇÃO DA HIDRODINÂMICA EM COLUNAS DE AERAÇÃO COM TÉCNICAS DE VELOCIMETRIA A LASER



(1)



(2)



(3)

Márcio Ricardo Salla (1)

Graduado em Engenharia Civil, Msc em Hidráulica e Saneamento (EESC/USP), Doutorando em Hidráulica e Saneamento (EESC/USP).

Harry Edmar Schulz (2)

Graduação em Engenharia Civil, Professor Titular do Departamento de Hidráulica e Saneamento (EESC/USP), Chefe do Departamento de Hidráulica e Saneamento (EESC/USP).

Alberto Carlos de Melo Lima (3)

Graduado em Engenharia Civil, Msc em Hidráulica e Saneamento, (EESC/USP), Doutorando em Hidráulica e Saneamento, (EESC/USP) e Professor do Curso de Engenharia Civil da UNAMA.

AVALIAÇÃO DA HIDRODINÂMICA EM COLUNAS DE AERAÇÃO COM TÉCNICAS DE VELOCIMETRIA A LASER

RESUMO: O presente trabalho foi concebido para integrar o conhecimento da área de Saneamento e da área de Mecânica dos Fluidos no Estudo das colunas de aeração e ozonização, utilizadas em tratamento de esgotos. Usos adicionais envolvem projetos-piloto de irrigação, no qual se aplica o reuso da água. Neste particular, vale lembrar que o presente trabalho foi incentivado pelo PROSAB, Edital 3, Tema 1: “Desinfecção de efluentes sanitários, remoção de organismos patógenos e substâncias nocivas. Aplicações para fins produtivos como agricultura, aquicultura e hidroponia” com o projeto: “Desinfecção de esgotos tratados em lagoas de estabilização e reuso em fertirrigação, piscicultura e hidroponia”, pelo incentivo dado ao tema em estudo.

O estudo foi conduzido inicialmente com a construção de uma coluna com 2,0 m de altura e base quadrada com 19,0 cm de lado. Os materiais utilizados na construção da coluna foram vidro, acrílico e perfis de aço. Os ensaios aqui relatados dizem respeito aos estudos de aeração, para os quais utilizou-se sulfito de sódio e geração de bolhas por intermédio de difusores. Para analisar as características das bolhas e do escoamento por elas gerado, fez-se uso de velocimetria a laser, utilizando um equipamento laser de gás de cobre, com potência média de 20W.

Para iniciar os experimentos na coluna de água, a mesma foi preenchida com água até a altura conveniente (oito alturas foram testadas). Posteriormente, adicionou-se sulfito de sódio para zerar a concentração de oxigênio nesta água (a quantidade de Sulfito de Sódio foi mantida fixa em todos os experimentos). A agitação necessária para homogeneizar a mistura foi obtida com o uso de uma bomba de recirculação para a água. O processo de aeração era iniciado com a escolha de uma vazão de ar, imposta no difusor, que gerava bolhas de tamanho médio definido e possibilitava a troca de oxigênio entre a água e o ar (cinco vazões de ar foram testadas). O oxigênio dissolvido na água era monitorado com auxílio de um medidor de membrana e um sistema computadorizado de aquisição de dados. As curvas de aeração (a evolução temporal do oxigênio dissolvido na água) foram analisadas, obtendo o coeficiente de reoxigenação para cada condição testada. Adicionalmente, com o uso de metodologia PIV (velocimetria por processamento de imagem de partículas), o laser foi utilizado para medir as velocidade das bolhas e seu tamanho médio.

Gráficos elucidativos, que explicam o teor das informações obtidas, são apresentados no trabalho.

O trabalho conjunto entre grupos de Saneamento e de Mecânica dos Fluidos mostrou-se útil para o avanço objetivo dos trabalhos.

INTRODUÇÃO

O oxigênio dissolvido contido nos corpos de água é um componente indispensável para a sobrevivência da vida aquática. Corpos de água naturais são avaliados, em termos de qualidade, utilizando o oxigênio neles dissolvido como um dos parâmetros relevantes nessa análise. Nos dias atuais, a autodepuração dos rios não é suficiente para eliminar os poluentes presentes na água, pois as quantidades de esgotos domésticos e industriais lançados nos rios são maiores do que a capacidade dos processos naturais de torná-las inertes. As indústrias lançam muitas vezes poluentes não biodegradáveis nos cursos de água (tais como compostos inorgânicos e metais pesados), os quais se acumulam nos ambientes naturais. Os esgotos domésticos, por outro lado, são constituídos geralmente de matéria orgânica, que é biodegradável. Porém, o consumo dessa matéria orgânica é feita por microorganismos presentes na água, cuja sobrevivência depende da quantidade de oxigênio dissolvido nela presente. Portanto, uma concentração insuficiente de oxigênio dissolvido implicará um número reduzido de microorganismos, aumentando a quantidade de poluentes na água.

Por esse motivo é preciso gerar mecanismos que façam com que a concentração de oxigênio dissolvido na água aumente artificialmente. Embora simples na sua explicação básica, os fenômenos de troca de massa envolvem problemas de quantificação de grandezas na interface ar-água, avaliação da turbulência, entre outros, que impedem, até o momento, que uma abordagem objetiva possa ser generalizada. Essa dificuldade faz com que seja necessário o engajamento de profissionais

especializados, capazes de estudar o problema a partir de seus múltiplos pontos de vista, buscando a solução mais viável para a quantificação do fenômeno.

As dificuldades mencionadas fizeram surgir vários métodos de aeração artificial, voltados para o aumento do transporte turbulento através do aumento da difusão turbulenta ou da área superficial de troca de massa entre o ar e a água. Neste último caso pode-se destacar o difusor de ar, que gera bolhas ascensionais e aumenta a taxa de troca global de massa na interface entre as bolhas e a água.

O tamanho com que as bolhas de gás entram em uma coluna e sobem por ela é função de vários parâmetros, como a vazão de gás que entra na coluna através do orifício ou difusor, o diâmetro do orifício, a turbulência existente na coluna, entre outros. De forma simples, resume-se que o tamanho é função da hidrodinâmica e das propriedades do líquido (TREYBAL, 1980). Vários estudos se concentraram no efeito das propriedades dos líquidos e da porosidade do difusor na determinação do diâmetro, forma e densidade das bolhas geradas, como por exemplo, HOUGHTON et al. (1957), que testaram vários líquidos.

A tecnologia atualmente disponível no mercado de difusores permite minimizar o diâmetro de bolhas, tanto de oxigênio como de ar, até um valor em torno de 2,0 a 5,0 μm . Esses diâmetros induzem a um baixo coeficiente de transferência de massa de oxigênio, quando comparados com os resultados de diâmetros menores. Objetiva-se nesta área, segundo a literatura, construir difusores ou dispositivos comerciais capazes de gerar bolhas de 300 a 1000 μm de diâmetro (0,3 a 1,0 mm) em grande quantidade, os quais deverão proporcionar maior eficiência de transferência de massa

de oxigênio para o meio líquido.(MOTARJEMI & JAMESON-1978)

Otimizar o tamanho de bolha considerando a profundidade de injeção é um tema interessante e implica em buscar a situação na qual esta bolha atinja a superfície sem oxigênio em seu interior (ou com uma quantidade bem reduzida). A necessidade de otimização do tamanho de bolhas é evidente, visto que bolhas de grande diâmetro chegam muito rápido à superfície, não havendo tempo suficiente para todo o oxigênio ser transferido à água, ao passo que, em bolhas muito pequenas, o oxigênio será transferido logo nas primeiras profundidades ascensionais, o que impróprio para grandes profundidades. (MOTARJEMI & JAMESON, 1978). Estudos de eficiência de transferência de oxigênio conduziram a resultados satisfatórios para efetuar previsões. Assim, mediante a performance dos difusores comercializados atualmente, com os quais se consegue minimizar o diâmetro de bolha até apenas 2,0 mm, para se transferir 95% do oxigênio disponível seria preciso colunas com alturas superiores a 10,0 m. Tais alturas mostram-se geralmente inviáveis, tanto pelo custo quanto pelas condições operacionais.

Conseqüentemente, há um amplo campo de trabalho aberto para a otimização de colunas com difusores, voltadas para o saneamento básico e ambiental, com a participação de pesquisadores de diferentes áreas.

EQUIPAMENTO DE TRABALHO

A coluna utilizada neste trabalho foi construída com seção transversal quadrada de 19,0 cm x 19,0 cm e 2,00m de altura, com 2 faces paralelas de acrílico

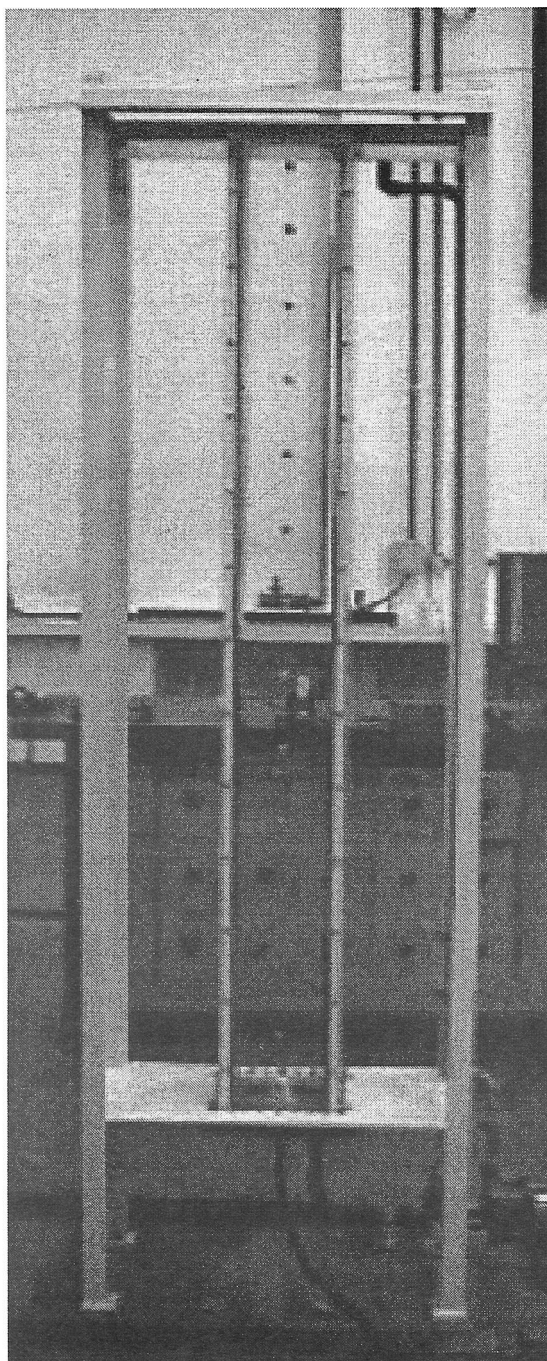
e 2 faces paralelas de vidro, ambas com espessura de 1.50 cm, juntamente com um fundo de acrílico de mesma espessura, conforme a Figura 1. As faces de acrílico e de vidro são planas para evitar correções geométricas quando da visualização.

As faces de vidro têm a finalidade de facilitar o registro das bolhas ascensionais através do uso da câmara de alta resolução. As faces de acrílico facilitam a perfuração das tomadas de água e demais trabalhos mecânicos. O acrílico também permite uma boa penetração da folha de luz do laser.

A base da coluna é provida de um difusor poroso localizado no centro da mesma e uma abertura para saída de água (esvaziamento da coluna ou recirculação da água para deaeração). Esta abertura é localizada próxima a um dos vértices da seção transversal. 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 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.

Segundo a ASCE STANDARD (1984), para se realizar medida de concentração de oxigênio dissolvido em águas limpas ou águas de abastecimento público, pode-se utilizar uma sonda com eletrodo de membrana ou o Método de Winkler. No presente trabalho foi usado um eletrodo de membrana, que consiste basicamente de um eletrodo ligado a um sistema de amplificação de sinal. O eletrodo é separado do meio líquido por uma membrana permeável ao oxigênio. Quando a sonda está em contato com o



**Figura 1 – Coluna construída para os trabalhos
Aqui descritos**

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. O aparelho medidor de oxigênio dissolvido apenas funciona em meios com um nível de agitação que permita renovar constantemente a água junto ao eletrodo. Contudo, o líquido presente na coluna mantém-se estacionário ao longo dos experimentos, tendo apenas o movimento das bolhas em ascensão, que é bastante restrito. Assim, foi preciso construir uma hélice de alumínio com 4 pás de 3,0 cm de diâmetro e posicioná-la ao lado da sonda. A rotação imposta foi de 440 rpm, proporcionando velocidade suficiente na cabeça do eletrodo.

Para a medida da velocidade ascensional das bolhas utilizou-se a técnica PIV (Particle Image Velocimetry), com fonte de luz Laser. A finalidade do Laser na velocimetria em escoamentos é iluminar uma seção do escoamento, possibilitando ótima visualização e registros de partículas, que são utilizados no cálculo do campo de velocidades. Para a realização deste trabalho foi utilizado um Laser de vapor de cobre, com alta taxa de repetição de pulsos de iluminação. Este Laser oferece pulsos de alta potência, que propicia uma folha de luz de alta densidade W/m^2 e grandes dimensões. As potências médias na saída do feixe estão entre 10 e 20 W, com uma taxa de repetição de pulsos que pode chegar a dezenas de KHz, com duração do pulso entre 20 e 60 ns.

Foram determinados os diâmetros equivalentes das bolhas para as vazões de estudo, 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 nitidamente 4 bolhas por imagem. A avaliação dos diâmetros foi feita através de medida linear em programa de edição de imagens.

As vazões de ar estudadas foram de 400, 800, 1200, 1600 e 2000 l/h. As profundidades da água na coluna foram de 0,50, 0,60, 0,80, 1,00, 1,20, 1,40, 1,60 e 1,80 m. Totalizou-se 40 experimentos em diferentes condições de trabalho. As temperaturas dos experimentos mantiveram-se praticamente constantes para cada experimento (oscilações menores do que 2 graus centígrados por experimento) e situaram-se entre 24 e 29° C. Os dados de transferência de oxigênio foram normalizados para 20° C. O oxigênio dissolvido era zerado na coluna com auxílio de Sulfito de Sódio para o início de cada experimento.

RESULTADOS

As curvas de aeração (oxigenação) da coluna foram analisadas e delas extraídos os coeficientes de transferência de massa. Os coeficientes normalizados para 20° C (KLa_{20}) estão indicados na Figura 2. Esses coeficientes são obtidos de análises de regressão não-linear com equações na forma apresentada na Equação 1:

$$C = C_s - (C_s - C_0) \exp(-KLa t) \quad (1)$$

C é a concentração no tempo t , C_0 é a concentração inicial (sempre zero no presente trabalho) e C_s é a concentração de saturação para cada experimento. KLa é o coeficiente de transferência de massa.

Observa-se tendência de aumento dos coeficientes de transferência de massa com o aumento da vazão de ar. Contudo, nenhuma tendência visível é observada com relação à profundidade da água. Observa-se um decréscimo do aumento de KLa_{20} com o aumento da vazão, sugerindo

uma situação de “saturação” para este parâmetro, ou seja, para a região das maiores vazões de ar, é preciso aumentar muito a vazão para conseguir aumentar o coeficiente de transferência de massa de forma substancial.

O diâmetro médio das bolhas é apresentado na Figura 3. Há aumento dos diâmetros médios com o aumento da vazão de ar aplicada. Cada ponto da figura 3 foi obtido considerando uma distribuição semelhante àquela da Figura 4, para a vazão de 400 l/h. No exemplo de 400 l/h, foram observadas bolhas com diâmetros variando de 1,0 a 3,0 mm. A tendência de crescimento observada na Figura 3 pode ser considerada linear, porém a pouca quantidade de pontos (apenas cinco pontos médios) impede uma conclusão mais segura.

A eficiência do processo de transferência de massa do ar para a água é calculada pelas equações 2 e 3:

$$\eta = \frac{\text{Massa de oxigênio transferido}}{\text{Massa de oxigênio fornecido}} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{(C_f - C_0) \cdot V_L}{Q \cdot X_{O_2} \cdot \rho_{ar} \cdot t_{op}} \quad (3)$$

C_f é a concentração de oxigênio dissolvido no final do ensaio, C_0 é a concentração de oxigênio dissolvido no início do ensaio, V_L é o volume de líquido da coluna, Q é a vazão de ar, X_{O_2} é a fração mássica de oxigênio no ar atmosférico ($X_{O_2}=0,209$), ρ_{ar} é a densidade do ar atmosférico e t_{op} é o tempo total de aeração em cada ensaio.

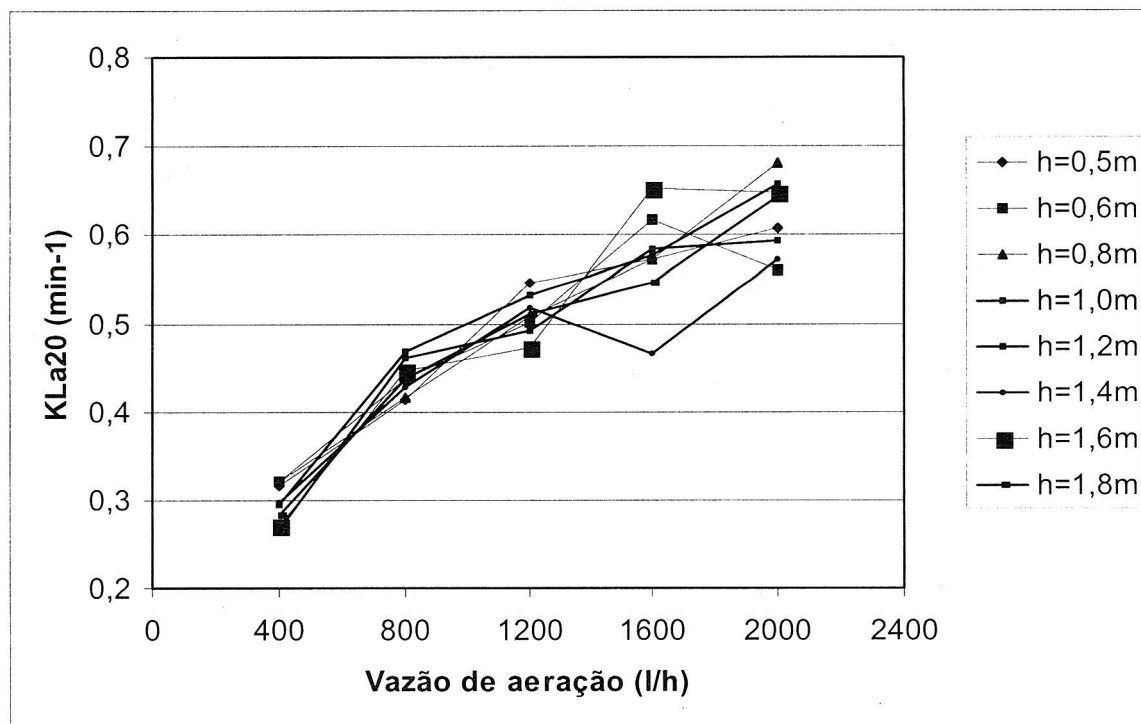


Figura 2: Coeficiente de transferência de massa em função da vazão de ar imposto à coluna líquida. Observa-se que o crescimento diminui com o aumento da vazão de ar.

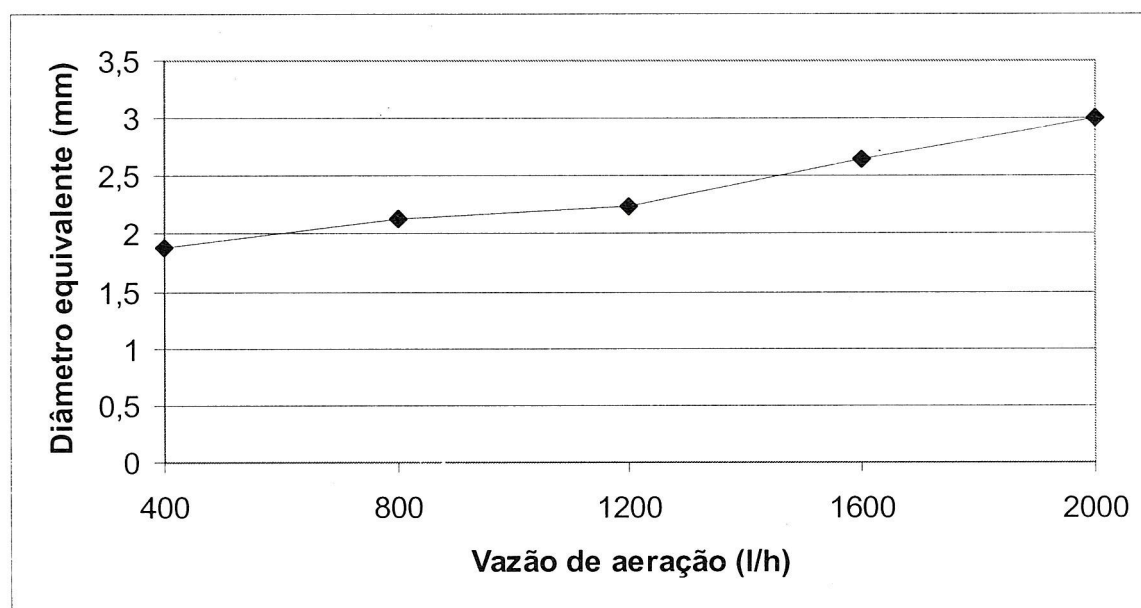


Figura 3: Crescimento do diâmetro médio das bolhas de ar com a vazão imposta.

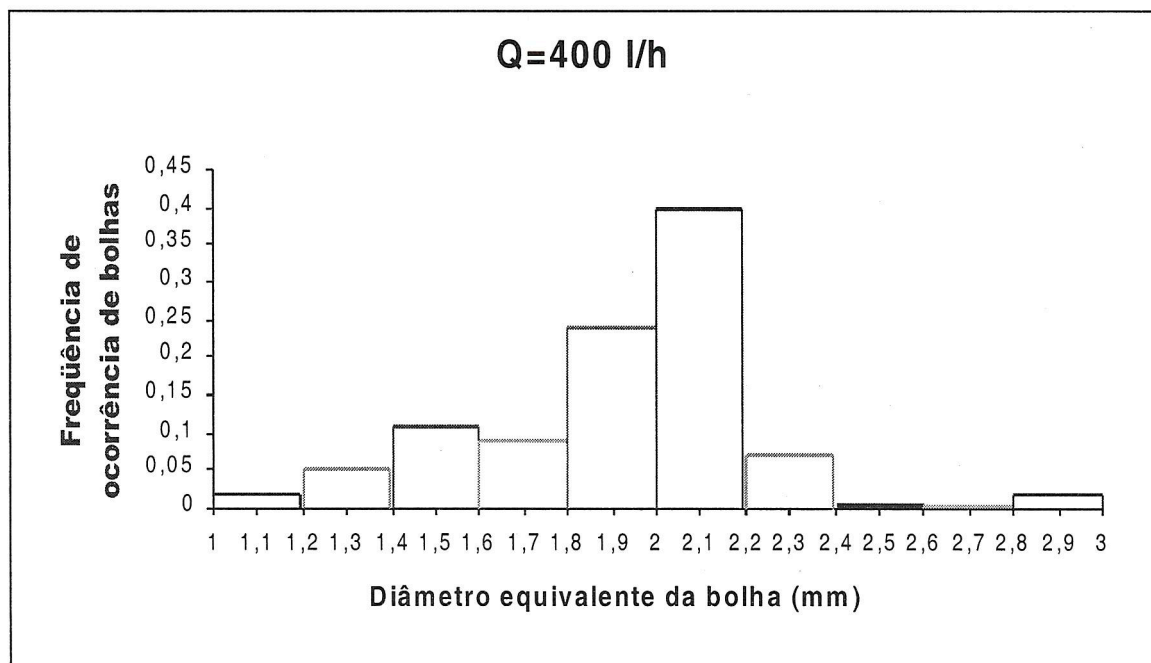


Figura 4: Distribuição de frequência do tamanho das bolhas para a vazão de 400 l/h.

A Figura 5 resume os dados deste trabalho. Visualiza-se uma mesma tendência geral em todas as curvas, que decrescem com o aumento da vazão. Para uma mesma vazão, observa-se que o valor da eficiência aumenta com o aumento do nível de água dentro da coluna. Atentando aos detalhes das curvas, observa-se a existência de duas regiões: A primeira região corresponde às profundidades de 0,50m a 1,00m, cujos dados se localizam na parte inferior da figura. Essas curvas apresentam tendência decrescente sem haver algum ponto de inflexão próximo à vazão de 400 l/h. A segunda região corresponde às profundidades de 1,20m a 1,80m, cujos dados se localizam na parte superior da figura. Essas curvas apresentam tendência final decrescente, porém havendo ponto de inflexão ou de máximo próximo à vazão de 400 l/h. As duas regiões ficam bem demarcadas pela existência de

sobreposição das curvas correspondentes às profundidades de 1,00m e 1,20m, cada qual com sua tendência, porém ocupando o mesmo espaço da figura.

Observa-se que a maior eficiência de transferência foi obtida para vazão de aeração de 800 l/h, com o nível de água na coluna de 1,80m. É possível inferir que há um ponto de máximo para alguma vazão entre 400 l/h e 800 l/h, para esta mesma profundidade. O mesmo comportamento é observado para a profundidade de 1,60m. Para as demais profundidades não se observa a existência de um ponto de máximo entre os extremos de vazão estudados neste trabalho.

Foi feita uma comparação da eficiência de transferência entre os dados obtidos neste trabalho e dados obtidos por INNOCENTINI(1996). Comparando a Figuras 5 e os dados de INNOCENTINI (1996), pode-se observar que a partir da vazão de 1200 l/h há coerência entre os

comportamentos dos dois conjuntos de dados, tanto com relação à tendência de decréscimo como quanto ao valor da eficiência obtido. Para vazões menores que 1200 l/h INNOCENTINI (1996) observou máximos em todos os seus ensaios, na faixa de vazões estudadas. Como já foi mencionado, este não é o caso do presente estudo. As diferenças entre os dois conjuntos de dados podem repousar nas diferenças geométricas dos dois equipamentos. Enquanto neste trabalho a seção transversal da coluna é de 0,19m x 0,19m, nos estudos de INNOCENTINI (1996) esta foi de 0,60m x 0,60m. Conseqüentemente, para um mesmo nível de água, os experimentos de INNOCENTINI (1996) contavam com 10 vezes mais volume de água do que no presente trabalho. Com isso, para uma mesma vazão

de ar há mais água a ser suprida de oxigênio. Isto pode ter acarretado os menores valores de eficiência obtidos por INNOCENTINI (1996) para as vazões menores que 1200 l/h. O tipo de difusor de ar utilizado foi diferente nos 2 trabalhos, o que pode ser o fator predominante para as diferenças comportamentais (picos). Embora INNOCENTINI (1996) tenha determinado a concentração de oxigênio dissolvido através do método de Winkler e neste trabalho tenha sido usado o medidor de membrana permeável, não se acredita que apenas o método de quantificação do oxigênio dissolvido conduziria a respostas díspares, uma vez que ambos os métodos são confiáveis. Para calcular a velocidade de ascensão das bolhas de ar utilizou-se metodologia PIV, que produz campos de velocidade

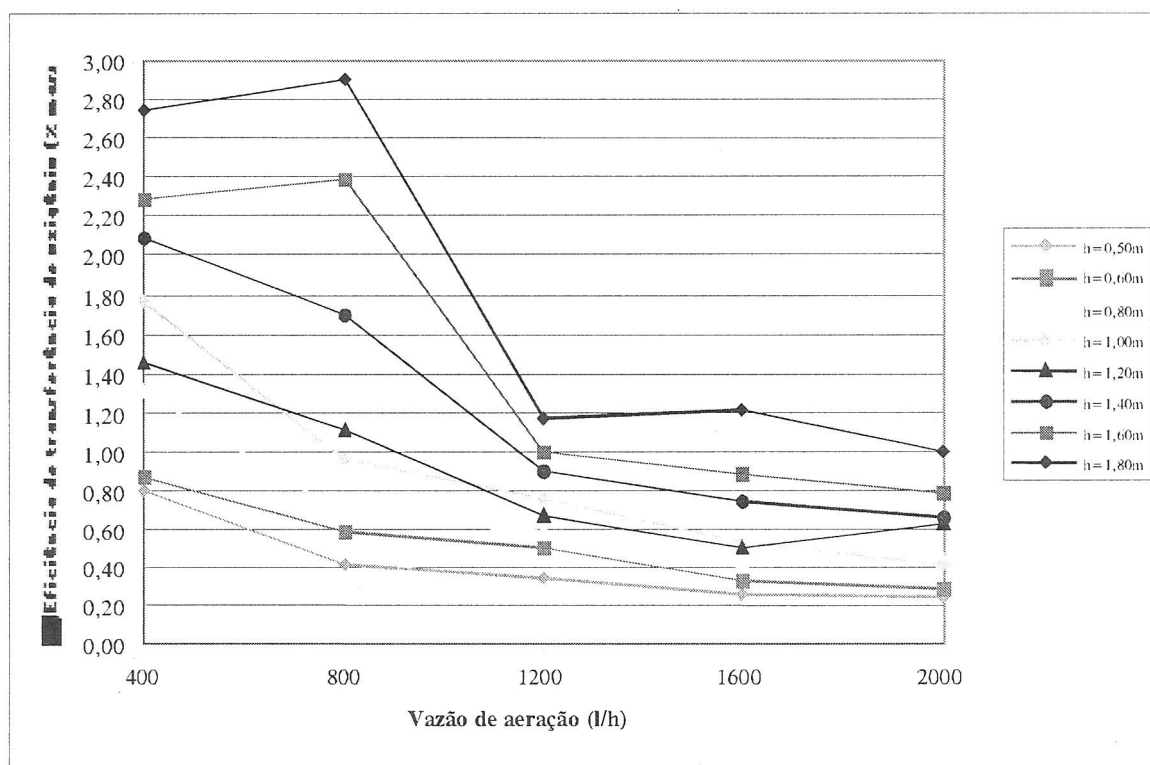


Figura 5 - Curvas de eficiência de troca de oxigênio entre ar e água para coluna com difusor.

instantâneos como aqueles indicados na Figura 6, obtido para uma situação específica de vazão de ar. A velocidade ascensional foi calculada como a média dos componentes verticais dos vetores. Um total de 320 campos de velocidade semelhantes ao da Figura 6 foram analisados para obter os valores de velocidade média ascensional. Esses valores, juntamente com os diâmetros médios, serão relevantes nas análises futuras dos coeficientes de transferência de massa medidos neste trabalho e previsões encontradas na literatura. A Figura 7 mostra a boa concordância entre os valores de velocidade medidos com a metodologia PIV (medido) e aquele obtido com o uso da vazão de ar e o diâmetro médio das bolhas (teórico), para uma profundidade de água de 1,80 m na coluna.

CONCLUSÕES

Verificou-se que a metodologia utilizada para medir o coeficiente de transferência de massa em colunas de aeração é adequado, permitindo observar tendências de “saturação” da curva de KLa_{20} em relação à vazão. A Figura 2 mostra consistência nos resultados obtidos para os 40 experimentos. Igualmente verificou-se que a obtenção dos tamanhos de bolhas a partir da medida de bolhas nítidas em fotografias obtidas com iluminação a partir de uma fonte Laser é adequada para os tamanhos de bolhas estudados. O crescimento do diâmetro médio das bolhas com o crescimento da vazão de ar está expresso na Figura 3 e mostra uma tendência aproximadamente linear. O grande número de dados necessários para obter os valores médios, contudo, mostra o quão trabalhoso é este método. Um exemplo do número de dados é mostrado na Figura 4.

Verificou-se que a coluna estudada

apresenta picos de eficiência para as condições de trabalho analisadas (Figura 5). Os picos ocorreram para as profundidades de água de 1,60 m e 1,80 m, para vazões entre 400 e 800 l/h.

Verificou-se que a metodologia PIV é adequada para obter a velocidade média ascensional das bolhas. Os valores obtidos com o uso de PIV e com o uso da vazão de ar e projeção horizontal da área de bolhas são compatíveis entre si.

As metodologias aqui aplicadas serão estendidas para colunas de ozonização.

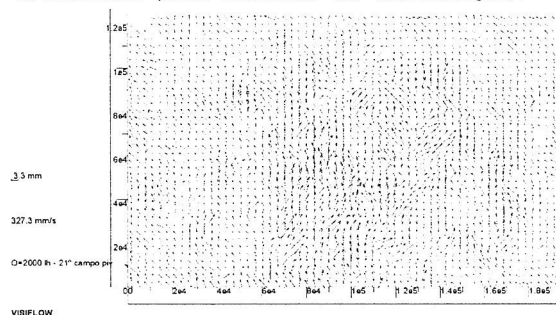


Figura 6: Campo instantâneo de velocidade para as bolhas ascensionais na coluna estudada obtido com metodologia PIV e fonte de luz Laser.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pelos auxílios 00/13953-6, 99/12636-8, e 99/12635-1, que permitiram conduzir esse trabalho. Agradecem ainda ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico, CNPq, pelo auxílio 520540/00.0 e pela bolsa concedida ao primeiro autor, bem como à Universidade da Amazônia pela bolsa concedida ao terceiro autor. Finalmente, agradecem ao PROSAB, Edital 3, Tema 1: “Desinfecção de efluentes sanitários, remoção de organismos patogênicos e substâncias nocivas. Aplicações para fins produtivos como agricultura, aquicultura e hidroponia” com

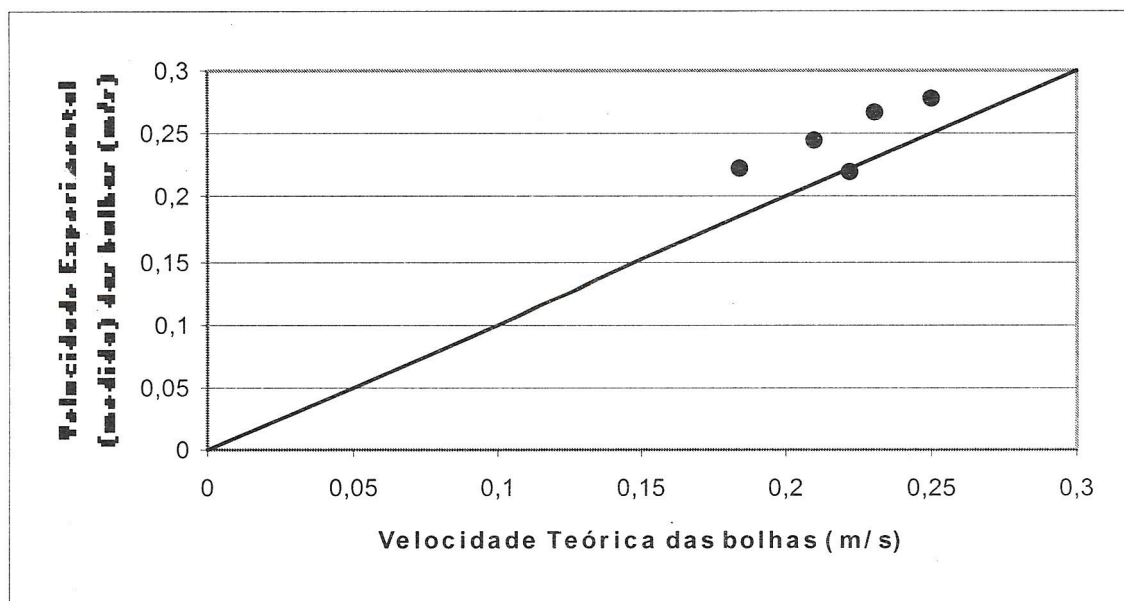


Figura 7 – Comparação entre os valores de velocidade experimental (medida) e a velocidade obtida com a vazão e dos diâmetros médios das bolhas, para o nível de água dentro da coluna de 1,80m.

o projeto: “Desinfecção de esgotos tratados em lagoas de estabilização e reuso em fertirrigação, piscicultura e hidroponia”, que incentivou o tema deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

HOUGHTON, G.; McLEAN, A.M.; RITCHIE, P.D. (1957). Mechanism of formation of gas bubble-beds. *Chemical Engineering Science* – v.7, p. 40-50, 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.

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.

TREYBAL, R.E. (1980). *Mass Transfer Operations*, Third Edition, McGraw-Hill Book Company, London.