

MEDIDAS DA CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO NA SUPERFÍCIE DA ÁGUA

MEASUREMENTS OF DISSOLVED OXYGEN CONCENTRATION AT WATER SURFACE

JOHANNES GERSON JANZEN

Engenheiro Civil. Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos – USP. Professor da Universidade Federal de Rondônia/UNIR

HARRY EDMAR SCHULZ

Engenheiro Civil. Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos – USP. Professor da Escola de Engenharia de São Carlos/USP

ANTÔNIO WAGNER LAMON

Técnico do Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos/USP

Recebido: 19/04/07 Aceito: 04/06/08

RESUMO

A transferência de gases através da interface ar-água é um processo importante para ciclos climáticos de grande escala e para sistemas ambientais menores como rios, lagos, córregos e estações de tratamento de esgoto. Para avançar no entendimento dos princípios básicos envolvidos no fenômeno é necessária a utilização de técnicas e aparatos experimentais adequados. Neste estudo, foram realizadas medidas de concentração através da utilização de micro sonda de oxigênio, em tanque de grade oscilante. A dimensão do elemento sensor da micro sonda é da ordem de alguns micra. Os resultados demonstram a possibilidade de medir, sob condições turbulentas controladas similares às encontradas no ambiente, as flutuações de concentração de oxigênio no interior da camada limite existente imediatamente abaixo da interface ar-água.

PALAVRAS-CHAVE: Transferência de gases, micro sonda de oxigênio, turbulência, tanque de grade oscilante.

ABSTRACT

Gas transfer across the air-water interface is an important process for large-scale climate cycles as well as smaller environmental systems such as rivers, lakes, streams, and wastewater treatment basins. To improve the understanding of the basic principles involved in this phenomenon it is necessary to use suitable apparatus and experimental techniques. In this study, a microprobe has been used for measurements of oxygen concentration in an oscillating-grid tank. The microprobe has tip dimensions of the order of a few microns. The results demonstrate that it is feasible to measure, under controlled turbulence conditions that are representative for environmental situations, the fluctuating oxygen concentrations that take place in a boundary layer below the air-water interface.

KEYWORDS: *Gas transfer, oxygen microprobe, turbulence, oscillating-grid tank.*

INTRODUÇÃO

A transferência de gases através da interface ar-água constitui uma importante etapa dos ciclos biogeoquímicos de numerosas substâncias, ao governar a sua transição entre o estado dissolvido na água e o estado gasoso na atmosfera. A previsão do comportamento desses ciclos é frequentemente necessária para engenheiros e gestores ambientais, pesquisadores e órgãos de fiscalização. Exemplos de substâncias importantes são: mercúrio, hélio, nitrogênio, carbono e oxigênio. O carbono, vinculado ao gás carbônico, tem sido objeto de debate atual devido ao efeito estufa a ele associado. Nesse caso, a transferência

de gás carbônico da atmosfera para os corpos de água (oceanos) é benéfica para inibir o efeito estufa.

Mesmo no contexto atual do aquecimento global, que impõe o estudo dos gases que o provocam, atenção especial deve ser mantida para a transferência de oxigênio. A quantidade de oxigênio dissolvido nos corpos de água é um indicador primário da qualidade da água. De fato, quando a concentração de oxigênio dissolvido na água cai abaixo de valores aceitáveis, pode afetar significativamente a saúde do ecossistema aquático e também impedir o uso da água para diferentes fins (por exemplo, abastecimento doméstico). A concentração de oxigênio dissolvido na

água é o resultado da interação de diversos processos que tendem a aumentar ou diminuir a mesma. A produção fotossintética e a reaeração atmosférica contribuem para o aumento da concentração de oxigênio na água, enquanto que o consumo de oxigênio para a decomposição da matéria orgânica e a respiração realizada pelo ecossistema aquático colaboram para a diminuição da quantidade de oxigênio dissolvido na água. A avaliação da absorção de oxigênio pelo corpo de água exige o estudo dos fenômenos que ocorrem junto à sua superfície, em uma camada delgada denominada geralmente de “camada-limite de concentração”. Os modelos matemáticos para a transferên-

cia de oxigênio, embora simples, exigem conhecimento detalhado da estrutura da concentração do gás no líquido no interior desta camada delgada.

O fluxo de massa, F [ML^2T^{-1}], através da interface ar-água é usualmente expresso por

$$F = K(C_s - C_\infty) \quad (1)$$

em que K [LT^{-1}] é a velocidade de transferência ou o coeficiente de transferência, C_s [ML^{-3}] e C_∞ [ML^{-3}] são, respectivamente, a concentração de saturação e do seio do fluido. Diversos pesquisadores, desde o começo do século passado, têm desenvolvido modelos incluindo as propriedades físicas consideradas relevantes nos processos interfaciais, para estimar a velocidade de transferência, K (Lewis e Whitman, 1924; Higbie, 1935; Dankwerts, 1951; Coantic, 1986; Schulz e Schulz, 1991). Apesar dos esforços, o objeto de estudo tem-se mostrado arduo a quantificações definitivas. Essa dificuldade está associada ao fato de a transferência de massa interfacial ser extremamente complexa. O ar e a água estão usualmente sujeitos ao movimento turbulento, a interface entre eles freqüentemente é irregular, podendo estar sujeita a ondas, muitas vezes acompanhadas por “quebras” e formação de bolhas. A complexidade é ainda aumentada pela presença de filmes superficiais de origem natural e antrópica, os quais modificam as características físico-químicas da interface. A complexidade do fenômeno tem estimulado o desenvolvimento de uma variedade de aparatos e técnicas experimentais.

No contexto de aparatos experimentais, a literatura mostra a utilização crescente de tanques de grades oscilantes para estudar a turbulência gerada junto ao fundo dos escoamentos. A justificativa básica para o uso desses equipamentos é que eles geram turbulência de forma controlada, adicionada ao fato de que a turbulência atinge a superfície por difusão, de baixo para cima, similarmente ao que ocorre em alguns ambientes naturais, preferencialmente em rios. Os equipamentos de grade oscilante geralmente possuem as seguintes características: uma grade (usualmente de seção quadrada) de malha M [L] (definido como a distância entre o centro de duas barras consecutivas), colocada em um fluido em repouso, é oscilada com uma amplitude S [L] e uma freqüência f [T^{-1}] produzindo

uma turbulência estacionária quase isotrópica a uma distância de 1 a 3 malhas da grade. Neste intervalo a razão entre a intensidade da turbulência vertical e a horizontal está tipicamente no intervalo de 1,1-1,3 e a velocidade média é aproximadamente zero. Evidentemente a descrição acima é simplificada, podendo haver diferenças entre as características dos equipamentos descritos na literatura. Vale mais uma vez frisar que os experimentos em tanques de grade oscilante têm sido utilizados como um meio simples e controlável de gerar turbulência, constituindo-se numa forma importante de se avançar no estudo da influência da turbulência em fenômenos físicos. A aplicação dos resultados abraça um amplo espectro de áreas, atualmente assumindo relevância na área ambiental, na qual se podem citar exemplos como a mistura de fluidos de diferentes densidades (Thompson e Turner, 1975; Hopfinger e Toly, 1976), transferência de gases entre ar-água (Brumley e Jirka, 1987; Chu e Jirka, 1992), dispersão de poluentes (Brunk et al, 1996), suspensão de sedimentos (Medina, Sanchez, Redondo, 2001) e coagulação (Brunk, Koch, Lion, 1998). De forma mais ampla, as aplicações envolvem as Engenharias Ambiental, Sanitária, Civil e Química, além das ciências básicas, sempre que processos físico-químicos ou biológicos dependerem do transporte de compostos (por exemplo: reagentes, nutrientes, poluentes ou gases) através de interfaces gás-líquido.

No contexto de técnicas experimentais, a literatura mostra a utilização de micro sondas para medidas de concentração de oxigênio dissolvido (Jirka e Ho, 1990; Chu e Jirka, 1992; Atmane e George, 2002). Como já foi mencionado, a transferência de oxigênio é controlada por uma fina camada limite de concentração que possui espessura da ordem de milímetros ou de fração de milímetros. Portanto, é necessária a utilização de instrumentos de medição de pequena dimensão, da ordem de alguns micra, que possibilitem medidas no interior da camada limite de concentração com boa resolução.

Este artigo apresenta medidas de concentração de oxigênio dissolvido, próximas à interface ar-água, utilizando uma micro sonda especialmente construída no Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP e um tanque de grade oscilante. Os resultados

mostram a real possibilidade de medir a concentração de oxigênio dissolvido sob condições turbulentas controladas, permitindo avançar no entendimento do mecanismo de transferência de gases através da interface ar-água e direcionar futuros trabalhos na área.

APARATO EXPERIMENTAL

Tanque de grade oscilante

A Figura 1 mostra o tanque de grade oscilante utilizado neste estudo. Os experimentos foram conduzidos em tanque feito de acrílico, com seção transversal quadrada de 50,0 cm \times 50,0 cm e altura de 115,0 cm. Uma grade com malha, M , de 5,10 cm foi utilizada, resultando em uma solidez de 32 %. A solidez é definida como sendo a relação entre a área horizontal ocupada pelas barras da grade e a área total da superfície do tanque. Uma solidez abaixo de 40 % é capaz de evitar movimentos secundários e heterogeneidades no plano horizontal (Hopfinger e Toly, 1976). A grade foi posicionada a 55,0 cm do fundo do tanque para evitar movimentos secundários. O sistema de oscilação da grade permite que se possam utilizar freqüências de oscilação da grade até 10,0 Hz e amplitudes de oscilação da grade entre 0,5 cm e 10,0 cm. Para mais detalhes do equipamento, ver Souza (2002) e Janzen (2003).

Neste estudo foi utilizada uma amplitude, S , de 2,0 cm e uma freqüência, f , de 8 Hz. A temperatura foi de 19,2 °C. Dessa forma, tem-se o número de Reynolds para o equipamento com valor $Re = 3123$ ($Re = fS^2/\nu$, em que ν [L^2T^{-1}] é a viscosidade cinemática da água). Este parâmetro permite a comparação com experimentos similares. Uma altura da água de 28,0 cm foi utilizada. A altura da água é definida como sendo a distância entre a superfície da água e o centro de oscilação da grade. Uma vez que a turbulência gerada por grades oscilantes é sensível às condições iniciais, a aquisição de dados iniciou-se somente 20 minutos após o início de movimento da grade (Cheng e Law, 2001).

Micro-sonda para concentração

Como já dito, a pequena espessura da camada limite de concentração exige a utilização de um instrumento de me-

dição com dimensão da ordem de alguns micra, que forneça medidas com boa resolução no interior da camada limite. Para atender a esse requisito foi confeccionada uma micro sonda de oxigênio, seguindo procedimento descrito em Lu e Yu (2002). Esta sonda foi confeccionada no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos/USP. A Figura 2 mostra a sonda utilizada neste estudo. A ponta da sonda possui diâmetro de 10,0 a 30,0 μm , onde há uma membrana que registra um sinal de corrente proporcional à pressão parcial de oxigênio. A constante de proporcionalidade é obtida através de um processo de calibração.

Para a calibração da sonda é necessário obter dois pontos: o ponto de saturação e o ponto de concentração nula. Para obter o ponto de saturação, a micro sonda foi imersa em um frasco contendo aproximadamente 200 ml de água. Ar comprimido (~ 21 % de oxigênio) foi borbulhado para o interior do frasco através de uma pedra porosa. Foi possível, assim, fixar o valor de saturação do oxigênio na água. Em seguida, a sonda foi imersa em um frasco, também contendo em torno de 200 ml de água, com concentração de oxigênio dissolvido nula. O oxigênio dissolvido foi retirado da água através da introdução de sulfito de sódio. Dessa forma, foi possível determinar o ponto de concentração nula.

A Figura 3 mostra esquematicamente os componentes utilizados para as medidas de oxigênio dissolvido com micro sonda. Antes da realização do experimento, o tanque foi preenchido com água de torneira. O oxigênio dissolvido foi retirado da água através da introdução de sulfito de sódio. A sonda foi, então, posicionada, através de um micro manipulador, na superfície da água, isto é, em $z = 0$. O ponto $z = 0$ foi determinado observando-se o início de formação do menisco devido ao contato entre a sonda e a água. Esse procedimento foi realizado com a grade desligada, uma vez que a oscilação da grade gera ondas na superfície, dificultando o correto posicionamento da sonda. Após o início de movimento da grade, a sonda foi posicionada na distância desejada. As medidas foram realizadas para quatro distâncias da interface: 0 μm , 50 μm , 100 μm e 200 μm . A sonda realiza medidas em



Fonte: Souza, 2002

Figura 1 - Tanque de grade oscilante, com seção transversal quadrada de 50,0 cm x 50,0 cm e altura de 115,0 cm. Para a visualização da grade, foram removidas do desenho duas placas de acrílico externas

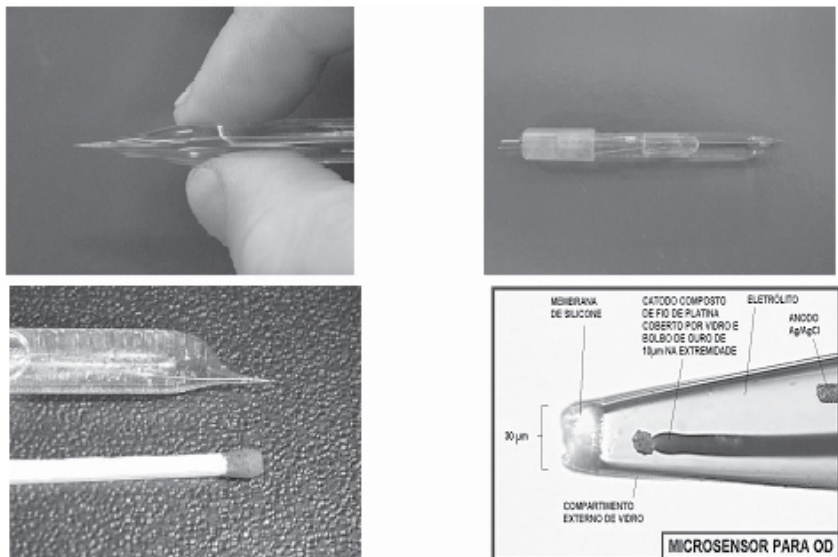


Figura 2 - Micro sonda de oxigênio. A ponta da sonda possui um diâmetro de 10,0 a 30,0 μm

intervalos fixos, pré-determinados no equipamento construído. O intervalo de tempo entre medidas, nesse caso, foi de 16,7 ms. As medidas tiveram uma duração de aproximadamente três minutos para cada distância da interface. Um computador foi utilizado para armazenar os dados.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

Observações qualitativas

A Figura 4 mostra a variação temporal da concentração instantânea adimensional, $(c - C_\infty)/(C_s - C_\infty)$ (c [ML⁻³] é a concentração instantânea dimensional), para diferentes distâncias da interface. Note que as medidas não são simultâneas, estando justapostas para fins comparativos. Na interface, a concentração é aproximadamente constante e igual ao valor de saturação. Vale a pena lembrar que, devido à oscilação da superfície, durante a realização do experimento a sonda permaneceu ora no interior da água, ora fora da mesma. Destaca-se ainda que, devido à oscilação da superfície, as distâncias da sonda à interface utilizadas neste texto são distâncias médias, definidas com o ponto $z = 0$ estabelecido antes do início da agitação da grade. Para a distância de 50 μm , a concentração de oxigênio dissolvido apresenta alta oscilação mostrando que se está em uma região na qual se intercalam elementos de fluido oriundos da interface com elementos do seio fluido, que ainda possuem as suas concentrações de oxigênio próximas ao ponto de origem. Já para as distâncias de 100 e 200 μm , a concentração torna-se basicamente igual à do seio do fluido, com exceção de alguns picos ocasionais, os quais podem ser associados, nas discussões mais conceituais, a processos de renovação superficial. A renovação da superfície é decorrente da ação da turbulência. Porções com alta concentração de oxigênio são extraídas da superfície por estruturas turbulentas e transportadas para o seio da água. Vale a pena comentar que a presença de surfactantes afeta diretamente a renovação da superfície (Shen, Yue, Triantafyllou, 2004; McKenna e McGillis, 2004). Superfícies limpas apresentam intensa renovação da superfície, enquanto que o oposto é observado em superfícies contaminadas.

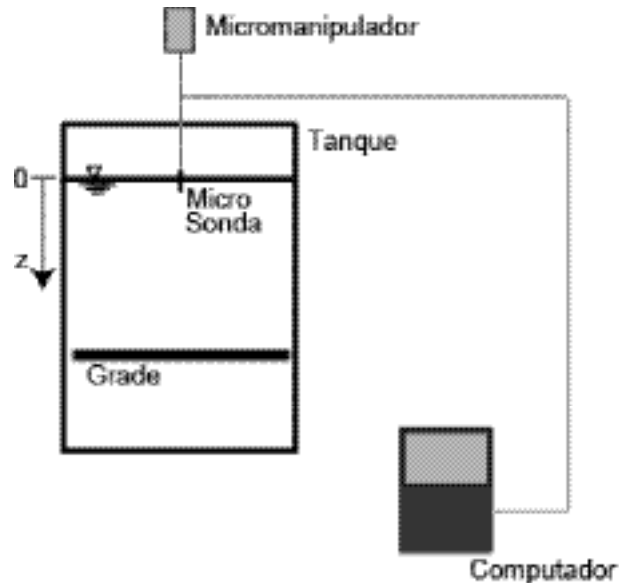


Figura 3 - Aparato experimental para medidas com micro sonda de oxigênio

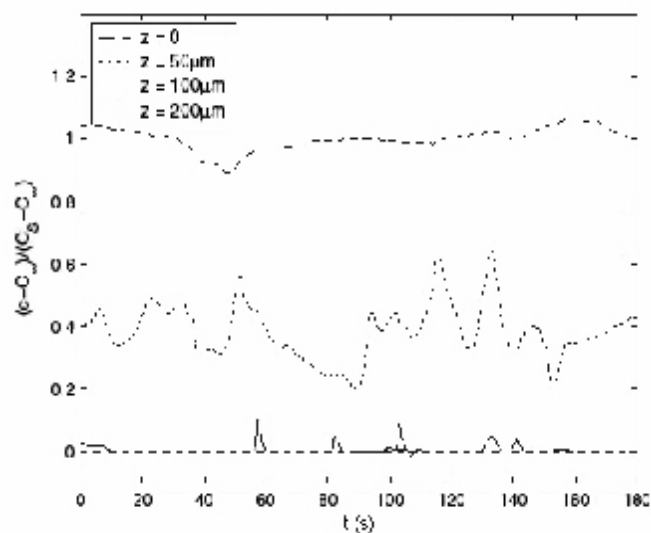


Figura 4 - Variação temporal da concentração instantânea adimensional

Concentrações médias

A evolução da concentração média de oxigênio na água permite estabelecer variáveis importantes para a avaliação dos fluxos de massa, como os gradientes de concentração. A Figura 5 apresenta o perfil de concentração da média adimensional, $C^* = (C - C_\infty)/(C_s - C_\infty)$ [ML⁻³], de oxigênio dissolvido. Nota-se que a concentração média decresce rapidamente de seu valor de saturação (1,0, na representação adimensional) para o valor do seio do fluido (0,0, na representação adimensional), região

esta na qual a concentração também é aproximadamente constante. A fronteira da camada limite de concentração é definida como sendo o lugar geométrico dos pontos para os quais a diferença entre o valor da concentração em um ponto arbitrário e do seio do fluido é igual a um por cento da diferença entre o valor da concentração na interface e do seio do fluido, isto é,

$$C^*(z) \frac{C(z) - C_\infty}{C_s - C_\infty} = 0,01 \quad (2)$$

Observa-se que isto equivale a dizer que a camada limite de concentração é o lugar geométrico onde

a concentração média adimensional atinge o valor de 0,01. Pode-se observar, na Figura 5, que a camada limite de concentração possui uma espessura menor que 10^{-4} m.

Desvio padrão das medidas de concentração

O desvio padrão das medidas de concentração da Figura 4 é uma medida da intensidade do processo de mistura das partes de água com diferentes quantidades de oxigênio. É, portanto, uma grandeza estatística que nos traz informações sobre a mistura em si, utilizada quando diferentes situações são analisadas comparativamente. No presente estudo não há casos comparativos, mas interessa o próprio comportamento do desvio padrão ao longo da distância à interface. A Figura 6 apresenta o perfil do desvio padrão da concentração, σ_c^* , adimensionalizado pela diferença de concentração existente entre a interface e o seio do fluido, $(C_s - C_\infty)$, conforme definido pela equação

$$\sigma_c^* = \frac{\sqrt{(c - C)^2}}{C_s - C_\infty} \quad (3)$$

É interessante notar que o valor do desvio padrão aumenta de um valor pequeno na interface, para um valor maior, decrescendo em seguida para valores próximos de zero. Os valores máximos encontrados na literatura variam entre 0,1 e 0,3 (Chu e Jirka, 1992; Atmane e George, 2002; Herlina, 2004). Embora sem contar com medições, Schulz e Schulz (1991) apresentaram um modelo fundamentado em movimentos advectivos em contra-corrente junto à interface para descrever a variação do desvio padrão da concentração. Segundo os autores, a variação adimensional do desvio padrão da concentração apresenta um pico abaixo da interface de valor menor que 0,5. Nota-se que os valores obtidos confirmam as considerações teóricas.

Tanto os resultados de concentração média como do desvio padrão da concentração mostram que grandes alterações comportamentais ocorrem a distâncias muito reduzidas da interface ar-água. No presente estudo, a camada-limite de concentração possui dimensão menor que $1,0 \cdot 10^{-4}$ m, enquanto que se verifica que um pico no desvio padrão das flutuações de concentração ocorre em torno de $5,0 \cdot 10^{-5}$ m abaixo da interface (ou 50 μ m). Assim, efetivamente

verifica-se a necessidade de instrumentos precisos e de dimensão reduzida para avançar no entendimento dos processos de transferência de massa em interfaces, seja para aplicação em engenharia ambiental, com seus problemas em macro-escala, seja para aplicação em projetos de engenharia sanitária, com seus problemas em escala de projeto. O presente equipamento preenche as necessidades experimentais, pelo menos em experimentos sujeitos a condições similares àquelas aqui conduzidas.

CONCLUSÕES

A interação entre a turbulência difundida de baixo para cima em corpos de água e a transferência de gases através da interface ar-água foi estudada experimentalmente em um tanque de grade oscilante utilizando uma micro sonda para medidas de oxigênio especialmente construída para isto. Os resultados mostram que é possível medir a concentração de oxigênio dissolvido no interior da camada limite de

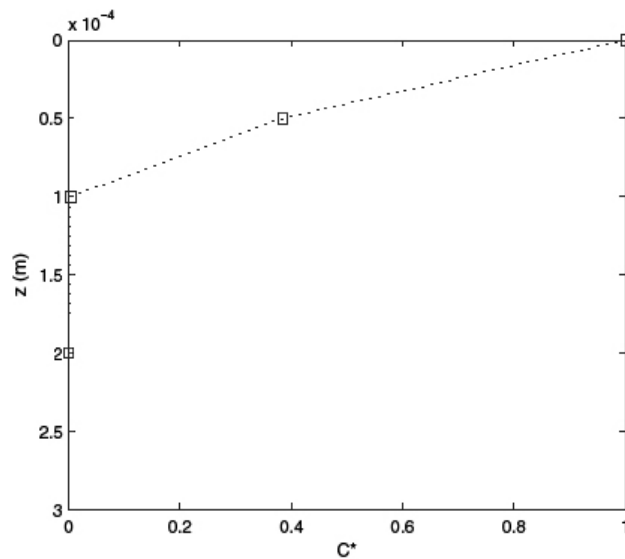


Figura 5 - Variação da concentração média adimensional com a distância da interface

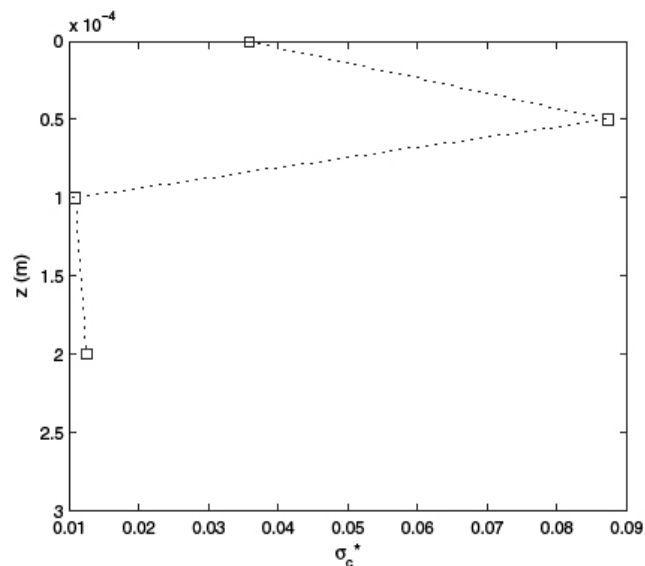


Figura 6 - Perfil do desvio padrão da concentração adimensionalizado pela diferença de concentração existente entre a interface e o seio do fluido ($C_s - C_\infty$)

concentração, sob condições controladas de turbulência semelhantes às encontradas no meio ambiente, a concentração de oxigênio dissolvido no interior da camada limite de concentração existente imediatamente abaixo da interface ar-água. As medidas mostraram uma rápida variação da concentração média do valor de saturação, na interface, para o valor do seio do fluido. A distância na qual ocorre esta variação é inferior a $1,0 \cdot 10^{-4}$ m. Observou-se ainda que, logo abaixo da interface, o desvio padrão da concentração aumenta e atinge um valor de pico. No presente estudo este valor de pico foi detectado a uma distância em torno de $5,0 \cdot 10^{-5}$ m da interface (ou cerca de 50 μ m). No seio do fluido, o desvio padrão apresenta valores próximos de zero. Qualquer avanço no entendimento dos fenômenos que ocorrem junto às interfaces ar-água, seja para incorporá-lo em modelos mais complexos dos ciclos naturais (nos moldes do aquecimento global), seja para auxiliar na busca de eficiência em equipamentos destinados a acelerar a transferência de gases em projetos de engenharia, passa, portanto, pelo uso de equipamentos de dimensões reduzidas como a sonda aqui descrita. Isto ocorre porque as estruturas fluidodinâmicas e de variação de concentração, que controlam os processos de transferência nas interfaces, desenvolvem-se integralmente em distâncias muito reduzidas da interface. O presente estudo mostra que essas medidas são factíveis, e que a técnica proposta é promissora para trabalhos de laboratório e de campo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao projeto PRONEX ("Desenvolvimento e Otimização de Sistemas Não-Convencionais de Tratamento de Águas Residuárias Constituídos de Reatores Biológicos e Físico-Químicos Dispostos em Série") sob coordenação do Prof. José Roberto Campos e à FAPESP, pelo financiamento desta linha de pesquisa; ao CNPq e à CAPES pelas bolsas que viabilizaram os trabalhos, em especial o processo CAPES 2201/06-2.

REFERÊNCIAS

ATMANE, M., GEORGE, J. *Gas transfer across a zero-shear surface: a local approach*. In: Gas transfer at water surfaces. Washington: American Geophysical Union, p. 255-259, 2002.

BRUMLEY, B.; JIRKA, G. *Near-surface turbulence in a grid-stirred tank*. Journal of Fluid Mechanics, v. 183, p. 235-263, 1987.

BRUNK, B. et al. *Modeling natural hydrodynamic systems with a differential-turbulence column*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 122, p. 373-380, 1996.

BRUNK, B., KOCH, D., LION, L. *Observations of coagulation in isotropic turbulence*. Journal of Fluid Mechanics, v. 371, p. 81-107, 1998.

CHU, C., JIRKA, G. *Turbulent gas flux measurements below the air-water interface of a grid-stirred tank*. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 35, p. 1957-1968, 1992.

COANTIC, M. *A model of gas transfer across air-waters with capillary waves*. Journal of Geophysical Research, v. 91, n. C3, p. 3925-3943, 1986.

DANKWERTS, P. *Significance of liquid film coefficients in gas absorption*. Industrial and Engineering Chemistry, v. 43, n. 6, p. 1460-1467, 1951.

HERLINA. *Gas transfer at the air-water interface in a turbulent flow environment*. Tese (Doutorado). University of Karlsruhe, Karlsruhe, 151 p., 2005.

HIGBIE, R. *The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure*. American Institute of Chemical Engineers, v. 31, p. 365-390, 1935.

HOPFINGER, E., TOLY, J.-A. *Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces*. Journal of Fluid Mechanics, v. 78, p. 155-175, 1976.

JANZEN, J. *Detalhamento das propriedades turbulentas em água agitada por grades oscilantes*. Tese (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 174 p., 2003.

JIRKA, G., HO, A. *Measurements of gas concentration fluctuations at water surface*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 116, n. 6, p. 835-847, 1990.

LEWIS, W., WHITMAN, W. *Principles of gas absorption*. Industrial and Engineering Chemistry, v. 16, n. 12, p. 1215-1220, 1924.

LU, R., YU, T. *Fabrication and evaluation of an oxygen microelectrode applicable to environmental engineering and science*. J. Environ. Eng. Sci., v. 1, p. 225-235, 2002.

MCKENNA, S., MCGILLIS, W. *The role of free-surface turbulence and surfactants in air-water gas transfer*. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 47, p. 539-553, 2004.

MEDINA, P., SANCHEZ, M., REDONDO, J. *Grid stirred turbulence: applications to the initiation of sediment motion and lift-off studies*. Phys. Chem. Earth B, v. 26, n. 4, p. 299-304, 2001.

SCHULZ, H., SCHULZ, S. *Modelling below-surface characteristics in water reaeration*. In: Water pollution, modelling, measuring and prediction. Southampton: Computational Mechanics Publications and Elsevier Applied Science, p. 441-454, 1991.

SHEN, L., YUE, D., TRIANTAFYLLOU, G. *Effect of surfactants on free-surface turbulent flows*. Journal of Fluid Mechanics, v. 506, p. 79-115, 2004.

SOUZA, L. *Estudo da estrutura turbulenta em escoamentos gerados por grades oscilantes*. Tese (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 69 p., 2002.

THOMPSON, S., TURNER, J. *Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid*. Journal of Fluid Mechanics, v. 67, p. 349-368, 1975.

Endereço para correspondência:

Johannes Gerson Janzen
Departamento de Engenharia
Ambiental - Universidade Federal
de Rondônia - UNIR
Rua Rio Amazonas, 351
78961-970 Ji-Paraná-RO - Brasil
Tel.: (69) 3421-3595
E-mail: jgersonj@gmx.net