

## Detalhes da Transferência de Gases na Interface Ar-Água

Johannes Gerson Janzen, Harry Edmar Schulz

Departamento de Hidráulica e Saneamento – EESC/USP

jgersonj@gmx.net

Gerhard Jirka

Institut für Hydromechanik – Universität Karlsruhe

Recebido: 24/04/06 – revisado: 08/05/06 – aceito: 17/08/06

---

---

### RESUMO

*Experimentos precisos foram conduzidos para obter informações sobre os princípios básicos envolvidos no mecanismo de transferência gasosa interfacial controlados pela fase líquida. Campos de concentração de oxigênio dissolvido foram quantificados em um tanque de grade oscilante através de técnica de fluorescência induzida por laser (LIF). A alta resolução dos dados é uma vantagem por revelar a distribuição da concentração no interior da camada limite de concentração, a qual possui somente alguns milímetros de espessura. Os campos de concentração medidos permitem visualizar o fenômeno de renovação da superfície. Perfis verticais da concentração média e do seu desvio padrão foram obtidos dos campos de concentração, que são informações relevantes para a exploração dos modelos aplicáveis à interface.*

**Palavras-chave:** *transferência de gases interfacial; fluorescência induzida por laser; tanque de grade oscilante; turbulência.*

---

---

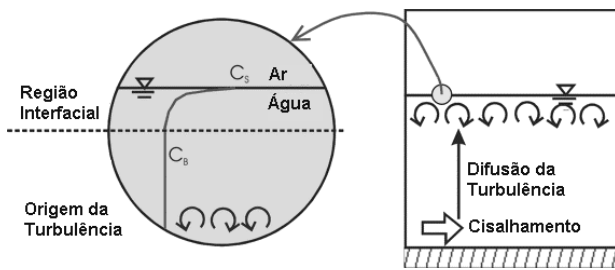
### INTRODUÇÃO

Uma grande quantidade de processos importantes em águas paradas e correntes, vinculados ao seu conteúdo de gases, é dependente diretamente das trocas gasosas entre ar e água. Tanto ciclos biogeoquímicos naturais como o transporte e transformação de resíduos antropogênicos, que influem na qualidade das águas, são influenciados por essas trocas interfaciais. Uma grande gama de operações industriais e operações relacionadas com as engenharias química e sanitária, como oxidação, hidrogenação e fermentação biológica envolvem também o contato entre gases e líquidos, geralmente envolvendo incorporação ou remoção de gases do líquido, com ou sem reação química. A Figura 1 ilustra algumas características de interfaces sujeitas a movimentos turbulentos.

Os exemplos mostrados revelam que o desconhecimento do fluxo de massa através da interface ar-água pode ser uma falha grave em previsões acerca do comportamento de sistemas naturais e artificiais. O fluxo de massa  $F$  é costumeiramente descrito por

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

onde  $C_S$  e  $C_\infty$  são, respectivamente, a concentração de saturação do gás e a concentração do gás no seio do fluido e  $K$  é a velocidade de transferência, também denominada de coeficiente de transferência. Diversos pesquisadores, desde o começo do século passado, têm desenvolvido modelos incluindo as propriedades físicas consideradas relevantes nos processos interfaciais, para estabelecer uma formulação matemática para o coeficiente de transferência interfacial (ver, por exemplo, Lewis e Whitman, 1924; Higbie, 1935; Dankwerts, 1951; Lamont e Scott, 1970; 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 os sistemas estudados geralmente estarem sujeitos a agitação turbulenta, um movimento altamente aleatório, instável e tridimensional. Tanto o movimento turbulento como o fenômeno da transferência de massa associado a ele são extremamente difíceis de serem descritos e previstos teoricamente. A turbulência é, por si só, um problema cujo equacionamento não possui ainda solução analítica, possuindo solução numérica para baixos números de Reynolds, no contexto da DNS (Simulação Numérica Direta).



**Figura 1** – Ilustração das condições existentes na transferência gasosa interfacial, atualmente simuladas por tanques de grades oscilantes.

Para entender os princípios básicos envolvidos no fenômeno é necessário um entendimento detalhado da região interfacial, onde a transferência de massa é controlada nas camadas limites de concentração (uma na fase gasosa e outra na fase líquida). Os detalhes dessas camadas limites são determinados pelas propriedades físico-químicas interfaciais. Para gases pouco solúveis, como o oxigênio, a transferência gasosa é controlada predominantemente pela camada limite líquida (Lewis e Whitman, 1924). A espessura da camada limite de concentração  $\delta$  é definida como sendo o lugar geométrico dos pontos nos quais a concentração adimensional  $C^*$  assume o valor 0,01, isto é,

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

Na eq.(2),  $C(z)$  corresponde à concentração distante  $z$  da superfície. O valor de  $\delta$  é da ordem de dez a mil micrômetros. Isso torna medidas de concentração no interior de camadas limites de concentração extremamente difíceis. Em épocas mais recentes (cerca de duas décadas), técnicas de fluorescência induzida por laser (LIF) têm sido utilizadas no estudo da transferência de massa através da interface ar-água. A técnica LIF se baseia na geração de fluorescência com compostos convenientemente escolhidos e dissolvidos no meio líquido e no registro fotográfico de campos de concentração assim obtidos. Vale mencionar que a concentração das soluções é muito baixa, geralmente não interferindo de forma observável nas características físicas do fluido solvente (usualmente água). A técnica, portanto, tem amplo espectro de aplicação. Além de ser não intrusiva, a técnica LIF fornece informações importantes do comportamento da concentração

próximo à interface, região de interesse neste estudo.

No presente caso, uma técnica LIF foi utilizada para obter campos de concentração na interface ar-água em um tanque de grade oscilante. Segundo Brumley e Jirka (1987), entre as principais fontes de turbulência que interferem na interface ar-água encontra-se a turbulência decorrente das tensões cisalhantes geradas junto ao fundo dos escoamentos, como é típico nos sistemas ambientais (rios, estuários) e processos industriais (canais de mistura) (Figura 1). Para simular tais condições de escoamento, a literatura mostra a utilização crescente de tanques de grades oscilantes, cujas características são apresentadas no item seguinte. Vale aqui frisar que os experimentos em tanques de grade oscilante têm sido utilizados como uma forma simples e controlável de gerar turbulência, constituindo-se numa maneira 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 o ar e a água (Brumley e Jirka, 1987; Chu e Jirka, 1992), dispersão de poluentes (Brunk *et al.*, 1996), suspensão de sedimentos (Medina *et al.*, 2001) e coagulação (Brunk *et al.*, 1998).

## TANQUE DE GRADE OSCILANTE

Tanques de grades oscilantes geralmente possuem as seguintes características: uma grade (usualmente de seção quadrada) de malha  $M$  (definida como a distância entre o centro de duas barras consecutivas), colocada em um fluido em repouso, é oscilada com uma amplitude  $S$  e uma frequência  $f$  produzindo uma turbulência estacionária “quase” isotrópica a uma distância de 1 a 3 malhas da grade. Nesse intervalo, a razão entre a intensidade da turbulência na vertical e na horizontal está tipicamente no intervalo de 1,1 a 1,3 e a velocidade média é aproximadamente zero.

A Figura 2 mostra o tanque de grade oscilante utilizado neste estudo. Os experimentos foram conduzidos em um tanque feito de acrílico, com uma seção transversal quadrada de 50,0 cm x 50,0 cm e uma altura de 65,0 cm. Uma grade com malha de 6,25 cm foi utilizada, resultando em uma solidez de 36% (definido como sendo a relação entre a área

horizontal ocupada pelas barras da grade e a área total da superfície do tanque). Segundo Hopfinger e Toly (1976) uma solidez abaixo de 40% é capaz de evitar movimentos secundários e heterogeneidades no plano horizontal. A grade foi posicionada a 20,0 cm do fundo do tanque para evitar movimentos secundários. Uma amplitude de oscilação  $S$  de 5,0 cm foi utilizada, enquanto que a frequência  $f$  foi variada de 2,0 a 5,0 Hz. A altura da água foi em torno de 28,0 cm (distância entre a superfície da água e a grade). A temperatura da água foi de 26,5 °C. A Tabela 1 apresenta os parâmetros experimentais, onde  $Re_y$  é o número de Reynolds definido como  $fS^2/\nu$  (onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática da água). Vale mencionar que este número de Reynolds representa uma variável independente (controlável) que permite sintetizar os dados coletados em diferentes condições. Particularmente, não há vínculos estabelecidos entre os valores deste número de Reynolds e “regimes de escoamento”, uma vez que, em essência, todos os experimentos ocorrem em regime turbulento quase-isotrópico. Uma vez que a turbulência gerada por grades oscilantes é sensível às condições iniciais, a aquisição de dados iniciou-se somente 10 minutos após o início de movimento da grade (Cheng e Law, 2001).

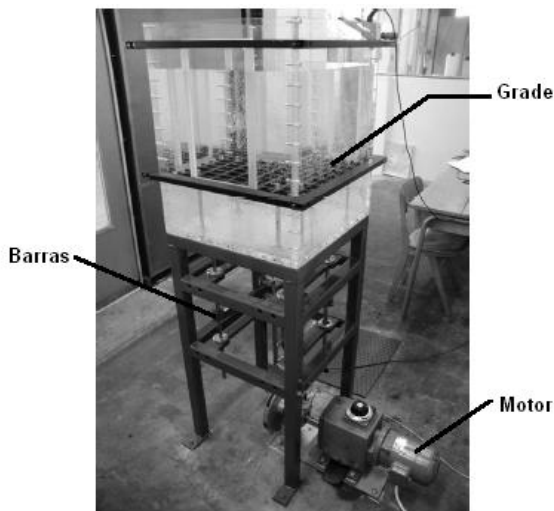


Figura 2 – Tanque de grade oscilante.

Tabela 1 – Parâmetros experimentais.

Experimento	$f$ (Hz)	$S$ (cm)	$Re_y$
1	2,0	5,0	5791
2	3,0	5,0	8687
3	4,0	5,0	11582
4	5,0	5,0	14478

## FLUORESCÊNCIA INDUZIDA POR LASER

Uma técnica de fluorescência induzida por laser (LIF) foi utilizada para obter campos de concentração de oxigênio dissolvido na interface ar-água. Vaughan e Weber (1970) mostraram que o ácido pirenobutírico (PBA) pode ser utilizado como um indicador da concentração de oxigênio dissolvido na água uma vez que o seu tempo de vida e intensidade fluorescente modificam-se na presença de oxigênio. Essa mudança no tempo de vida  $\tau$  e intensidade fluorescente  $F$ , também denominado de “abafamento”, é quantitativamente descrito pela equação de Stern-Volmer:

$$\frac{F_0}{F} = \frac{\tau_0}{\tau} = 1 + K_{SV}C, \quad (3)$$

onde  $F_0$  e  $\tau_0$  são a intensidade e tempo de vida fluorescente, respectivamente, na ausência de oxigênio,  $K_{SV}$  é a constante de “abafamento” (também denominada de constante de Stern-Volmer) e  $C$  é a concentração de oxigênio dissolvido. Portanto, a concentração do “abafador” (nesse caso o oxigênio dissolvido) pode ser determinada através da medição da intensidade fluorescente emitida de um indicador molecular (nesse caso o PBA).

A Figura 3 mostra o sistema LIF utilizado neste estudo. O tanque foi preenchido com água e PBA em solução, este último com uma molaridade de  $2 \times 10^{-5}$  M. A desoxigenação da água foi feita através do borbulhamento de nitrogênio.

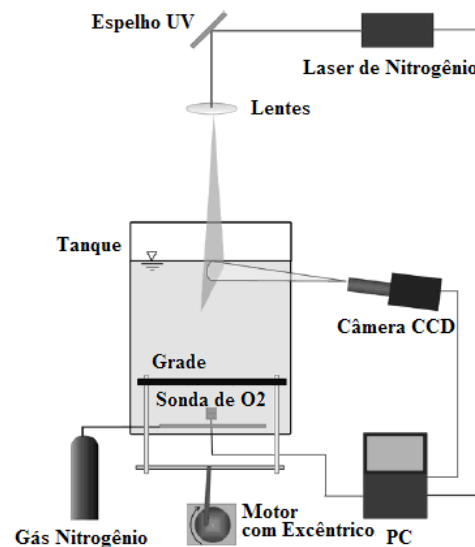


Figura 3 – Configuração experimental.

A concentração inicial de oxigênio dissolvido foi em torno de 0,7 mg/l após 20 minutos de borbulhamento. Um laser de nitrogênio pulsante (MNL 801), com uma potência média de 0,4 mJ e um comprimento de onda de 337,1 nm, foi utilizado para excitar o PBA. O feixe do laser foi guiado para o centro do tanque através de um espelho e uma combinação de lentes. Uma câmera CCD (1024 pixels x 1280 pixels e 12 bit), juntamente com uma macro objetiva, foi utilizada para obter imagens de aproximadamente 9,5 mm x 11,9 mm a uma distância aproximada de 30 cm do plano da fotografia. Dessa forma, as medidas tiveram uma resolução aproximada de 9 µm. Um filtro foi utilizado diante da câmera visando assegurar a captura somente da intensidade fluorescente emitida pelo PBA. O PBA emite fluorescência entre 370 e 410 nm. Novecentas imagens foram capturadas para cada experimento.

## PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

A Figura 4 mostra uma imagem instantânea de intensidade fluorescente obtida. Uma série de passos para correção das imagens necessita ser realizada antes que a informação da concentração possa ser extraída. Esses passos incluem remoção do ruído, localização da superfície da água, correção da atenuação da luz do laser e correção de um efeito óptico próximo à interface.

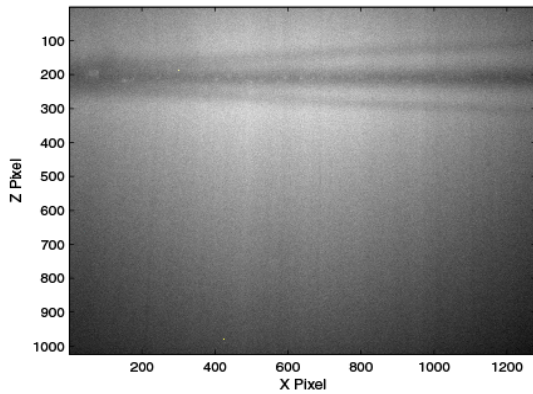


Figura 4 – Imagem fluorescente não processada.

**Remoção do ruído.** Dez iterações na direção horizontal  $x$  e 5 iterações na direção vertical  $z$  foram efetuadas para remover o ruído. O tamanho do filtro na direção  $x$  foi de 19 pixels e na direção  $z$  foi de 9 pixels. Diferentes tamanhos foram escolhidos, uma

vez que não existem gradientes de concentração muito intensos na direção horizontal, ao contrário do que ocorre na direção vertical. Para a direção horizontal foi utilizado o filtro gaussiano enquanto que para direção vertical foi utilizado o filtro de Wiener. A Figura 5 mostra um exemplo de um perfil de intensidade fluorescente vertical (isto é, de uma coluna obtida a partir da Figura 4) antes e depois da remoção do ruído, conforme aqui descrito.

**Localização da superfície da água.** Pode-se também notar, na Figura 5, que há uma reflexão na superfície da água, representada por um ponto de mínimo local para a intensidade fluorescente. Acima e abaixo da interface há a reprodução quase especular da mesma função. Pode-se, portanto, localizar a superfície através da procura do lugar onde a primeira derivada dessa função se anula. Para isso foi utilizado o método de Canny (Herlina e Jirka, 2004). Uma vez que seguramente só há um ponto de mínimo na região em torno da superfície da água não há a necessidade de se verificar a derivada segunda ou implementar esquemas mais sofisticados. Nota-se que nas Figuras 5b e 6a surgem oscilações, porém fora da região de estuda da superfície.

**Correção da atenuação da luz do laser.** À medida que o feixe do laser atravessa a água contendo PBA, há uma redução exponencial da intensidade fluorescente. Esse efeito, também denominado de decaimento de Lambert-Beer, é descrito pela equação

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha C_{PBA} z), \quad (4)$$

onde  $I$  é a energia da luz do laser no fluido na posição  $z$ ,  $I_0$  é a energia do laser quando entra no fluido,  $\alpha$  é uma constante,  $C_{PBA}$  é a concentração de PBA e  $z$  é a distância percorrida pela luz no fluido. Na prática o ajuste da eq.(4) é feito conhecendo-se a distância  $z$  e ajustando o produto  $\alpha C_{PBA}$  como uma única constante. A ordem de grandeza desse produto, no presente trabalho, é de  $4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ . O decaimento Lambert-Beer para cada coluna é determinado através do ajuste de uma curva exponencial na região do seio do fluido. A Figura 6a mostra o decaimento Lambert-Beer (eq. 4) relativo ao perfil vertical filtrado apresentado na Figura 5b. O efeito Lambert-Beer em cada coluna vertical foi, então, levado em conta dividindo a intensidade registrada (Figura 5b) pela expressão exponencial da equação de Lambert-Beer. A Figura 6b mostra as medidas corrigidas.

**Correção do efeito óptico próximo à interface.** O perfil vertical corrigido com o uso das técnicas aqui descritas, incluindo a eq.(4), apresenta uma diminuição do gradiente próximo à interface (como mostrado na Figura 6b). O mesmo fenômeno foi observado por outros autores (Woodrow e Duke, 2001; Herlina e Jirka, 2004). No atual momento do conhecimento das características interfaciais, entende-se que essa característica não representa um fenômeno físico, mas uma distorção óptica da realidade. Considerando verdadeira essa afirmação, a distorção é corrigida simplesmente extrapolando o maior gradiente obtido ( $dI/dz_{máx}$ ) até a interface (conforme mostra a Figura 6b no canto superior esquerdo).

$$C^*(z) = \frac{C(z) - C_\infty}{C_s - C_\infty} = \frac{F_I [F_\infty - F(z)]}{F(z) [F_\infty - F_I]}, \quad (5)$$

onde  $F_I$  e  $F_\infty$  são, respectivamente, a intensidade fluorescente na interface e no seio da água. Note-se que o eixo  $z$  é transladado em 223 pixels em relação ao eixo  $z_{pixel}$  das Figuras 4 a 7, ou seja,  $z = z_{pixel} - 223$ . Por conseguinte, o valor da concentração adimensional varia de 1,0 na interface a 0,0 no seio do fluido. A Figura 7 apresenta o perfil de concentração vertical adimensional referente à Figura 6.

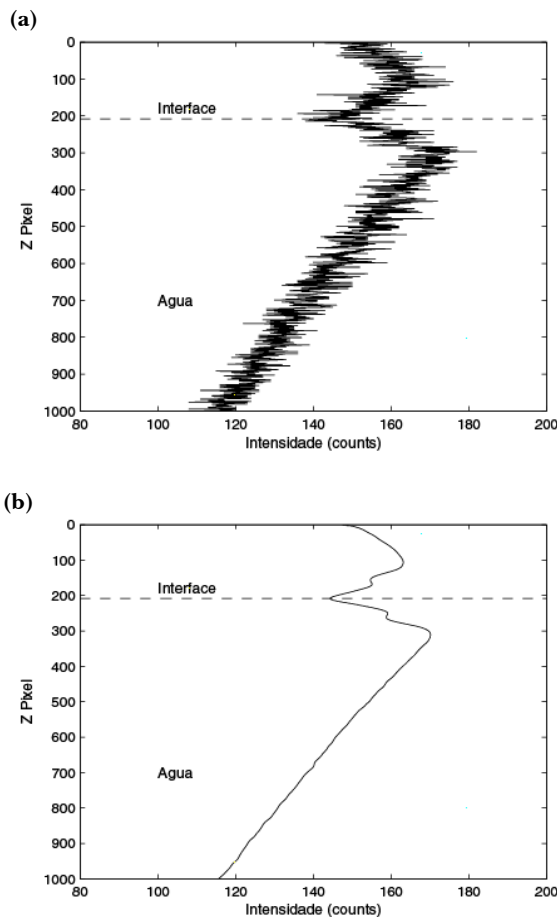


Figura 5 – Perfil de intensidade fluorescente vertical: (a) antes e (b) após a remoção do ruído.

Finalmente, a informação da concentração média pode ser extraída das leituras de intensidade fluorescente. A concentração média de oxigênio dissolvido pode ser expressa em forma adimensional

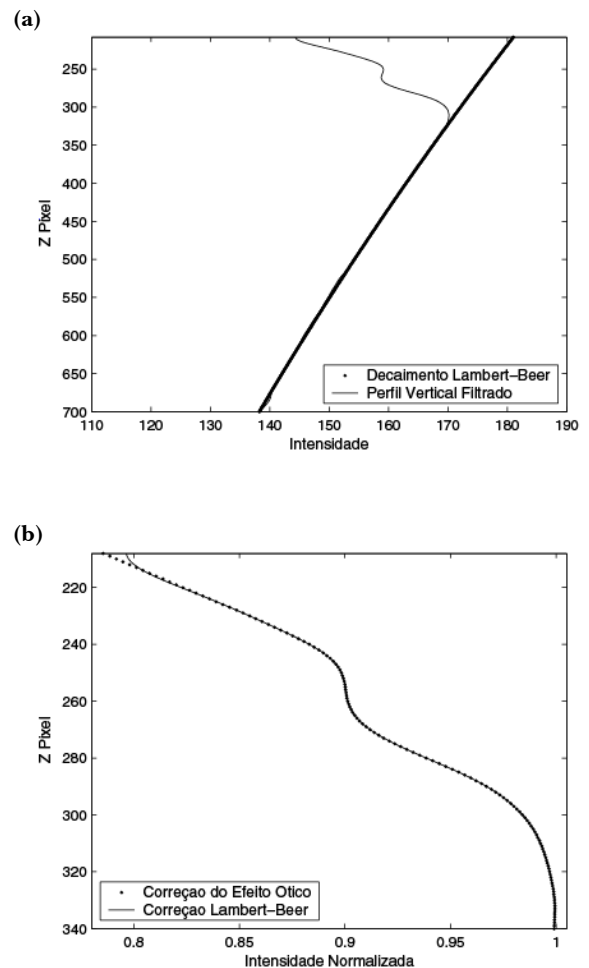


Figura 6 – (a) Ajuste da curva para o decaimento Lambert-Beer; (b) Intensidade normalizada e correção do efeito óptico junto à interface.

O nível de detalhamento obtido é alto, permitindo que se observe todo o desenvolvimento

da camada limite de concentração sob o efeito da turbulência.

### OBSERVAÇÕES QUALITATIVAS

A Figura 8 apresenta uma seqüência de fotografias de campos de concentração instantâneos de oxigênio dissolvido. O intervalo entre as imagens é de 2 s. Pode-se observar uma camada bem definida próxima à interface, onde a concentração varia rapidamente da condição de saturação para a condição do seio do fluido. Nota-se também que, exteriormente a essa camada, a concentração de oxigênio dissolvido é relativamente constante e próxima de zero, o que é uma decorrência do intenso processo de mistura proporcionado pelo movimento turbulento gerado pela grade.

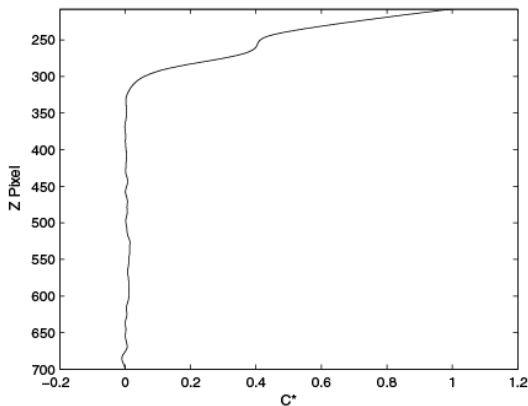


Figura 7 – Perfil vertical da concentração instantânea adimensionalizada.

É também interessante observar o papel da turbulência na transferência gasosa interfacial. Nota-se que altas concentrações de oxigênio dissolvido são extraídas da superfície, por uma estrutura de movimento decorrente da turbulência existente no meio, e levadas para o seio do fluido. As imagens aqui obtidas corroboram observações similares feitas por Herlina e Jirka (2004). O padrão de inserção de oxigênio na água, diretamente observado, permite que se busque o estabelecimento de modelos para descrever o comportamento tanto da concentração média como das flutuações de concentração, essas últimas importantes na quantificação do fluxo de massa turbulento.

### CONCENTRAÇÃO MÉDIA E DESVIO PADRÃO

A Figura 9 apresenta os perfis de concentração média de oxigênio dissolvido para diferentes condições experimentais. Pode-se observar que os perfis com condições turbulentas mais intensas possuem gradientes iniciais (junto à superfície) mais agudos em relação aos perfis com condições turbulentas menos intensas.

É conveniente lançar em gráfico os perfis de concentração média em relação a uma distância adimensional  $z^*$ . Nesse caso, a distância da interface  $z$  foi adimensionalizada com a espessura da camada limite de concentração  $\delta$  (ver Figura 10). Pode-se observar que todos os perfis ajustam muito bem a uma única curva, indicando que a espessura da camada limite de concentração é uma escala conveniente para a adimensionalização da distância.

A Figura 11 mostra os valores da espessura da camada limite de concentração para diferentes números de Reynolds. Pode-se notar que o valor da espessura da camada limite de concentração decresce para condições turbulentas mais intensas.

A Figura 12 apresenta os valores do desvio padrão da concentração  $c'$  adimensionalizados pela diferença de concentração existente entre a interface e o seio do fluido ( $C_S - C_\infty$ ), conforme definido pela equação

$$c' = \frac{\sqrt{(C - \bar{C})^2}}{C_S - C_\infty} \quad (6)$$

É interessante notar que os valores do desvio padrão atingem um máximo para  $z^*$  em torno de 0,25. 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 pode ser descrita em função da variação espacial da concentração média adimensional (eq. 5) como segue:

$$c' = \sqrt{[1 - C^*(z)] C^*(z)} \quad (7)$$

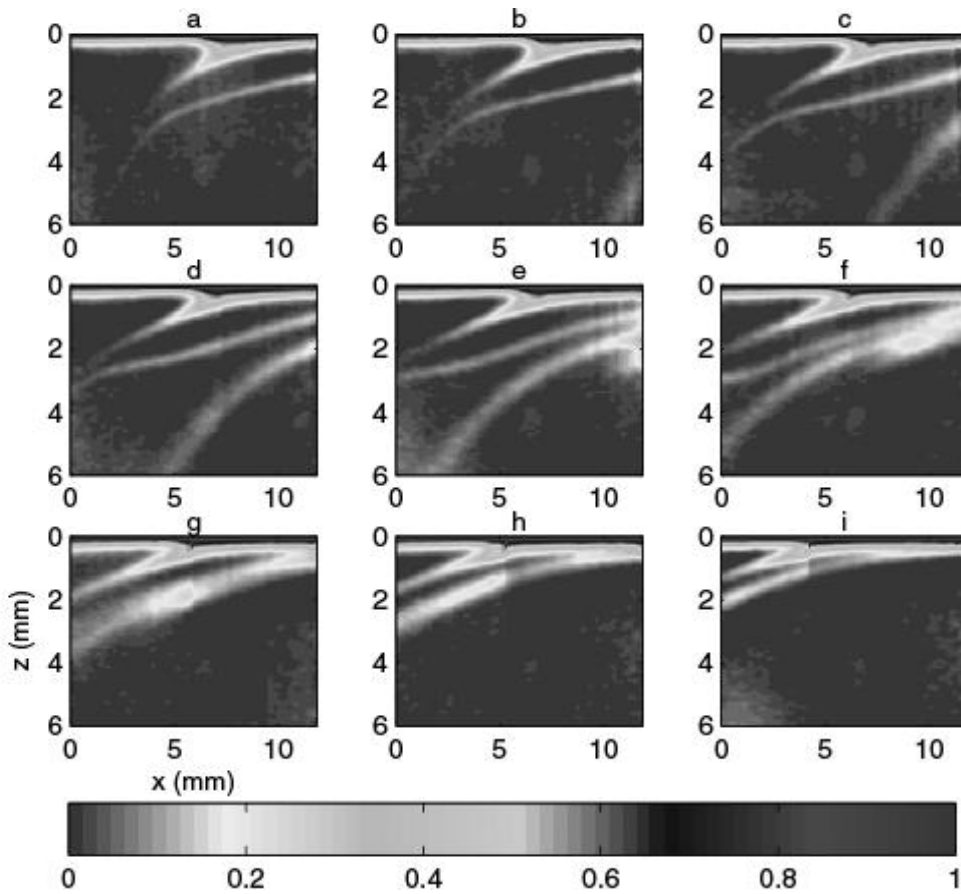


Figura 8 – Campos de concentração instantâneos de oxigênio dissolvido.

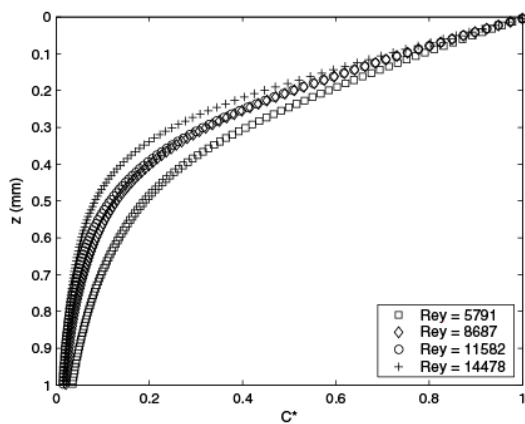


Figura 9 – Perfis de concentração média.

A eq.(7) representa o caso extremo em que a difusão molecular não contribui para o estabelecimento do perfil do desvio padrão da concentração. Apesar dessa situação não representar o real fenômeno físico, permite concluir a ocorrência de um pico abaixo da interface de valor menor que 0,5. Os valores de pico do desvio padrão aqui obtidos estão entre 0,13 e 0,17 confirmando as considerações teóricas. Ademais, os resultados mostram que o pico oscila em torno de um valor razoavelmente constante, quando as condições experimentais são modificadas. Adotando, para a variação adimensional da concentração média uma forma exponencial, tem-se o perfil de  $c^*$  mostrado na Figura 13, cujo pico tem valor máximo de 0,5. Os resultados do presente estudo mostram que os dados seguem a forma geral prevista teoricamente.



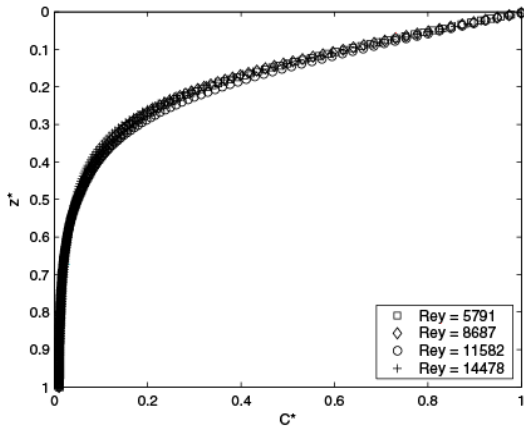


Figura 10 – Perfis de concentração média em relação à distância adimensional.

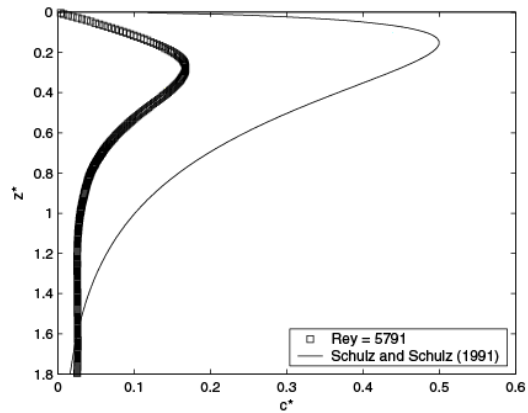


Figura 13 – Perfil de  $c^*$  obtido experimentalmente e comparação com a aproximação teórica de Schulz e Schulz (1991).

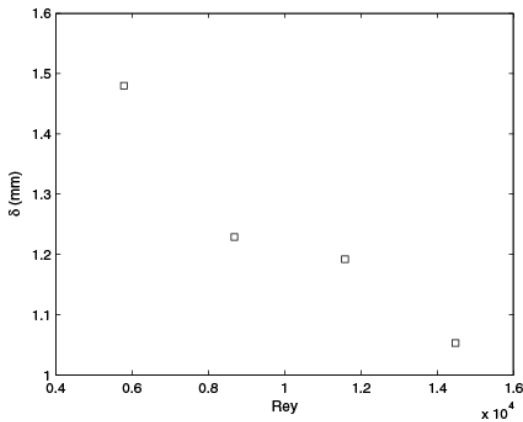


Figura 11 – Espessura da camada limite de concentração em função do número de Reynolds.

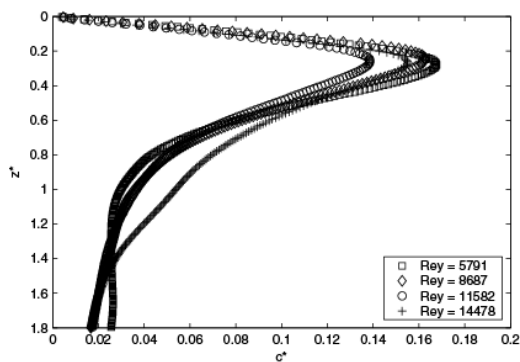


Figura 12 – Perfis de desvio padrão da concentração em relação à distância adimensional.

## CONCLUSÕES

A interação entre a turbulência gerada no fundo e a transferência de gases através da interface ar-água foi estudada experimentalmente em um tanque de grade oscilante por meio da técnica LIF. Pôde-se constatar que volumes com alta concentração de oxigênio dissolvido são extraídos da superfície e levados para o seio do fluido. Também se observou que a camada limite de concentração diminui conforme a agitação turbulenta aumenta. Com relação às observações vinculadas aos perfis de concentração média, verificou-se que gradientes menores são obtidos com a diminuição do número de Reynolds. Com relação ao desvio padrão da concentração, verificou-se que o mesmo atinge um valor máximo em torno da posição que caracteriza cerca de 25% da espessura da camada limite de concentração ( $z^*=0,25$ ). Foi possível quantificar as espessuras das camadas limites para as diferentes condições experimentais, além de observar toda a evolução de perfis de concentração e de desvio padrão da concentração média. Os dados são precisos e atestam pela validade da metodologia aqui seguida.

Adicionalmente, a comparação com um modelo teórico para a região interfacial, no que tange à evolução do desvio padrão, mostrou que as características gerais descritas pelo modelo são observadas. Os detalhes aqui obtidos mostram que a análise dos fenômenos interfaciais gás-líquido pode ser adequadamente conduzida por meio do presente procedimento.



## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela manutenção da linha de pesquisa em turbulência e processos interfaciais de transferência de massa; ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq) pelas bolsas concedidas ao primeiro e terceiro autores; ao Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC-USP, e ao Institut für Hydromechanik, da Universidade de Karlsruhe, pela execução conjunta de experimentos em seus laboratórios.

## REFERÊNCIAS

- BRUMLEY, B. H.; JIRKA, G. H. (1987). *Near-surface turbulence in a grid-stirred tank*. Journal of Fluid Mechanics, v. 183, p. 235-263.
- BRUNK, B. K.; KOCH, D. L.; LION, L. W. (1998). *Observations of coagulation in isotropic turbulence*. Journal of Fluid Mechanics, v. 371, p. 81-107.
- BRUNK, B.; WEBER-SHIRK, M.; JENSEN, A.; JIRKA, G.; LION, L. W. (1996). *Modeling natural hydrodynamics systems with a differential-turbulence column*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 122, n. 7, p. 373-380, Jul.
- CHENG, N. S.; LAW, A. W. K. (2001). *Measurements of turbulence generated by oscillating grid*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 127, n. 3, p. 201-208, Mar.
- CHU, C. R.; JIRKA, G. H. (1992). *Turbulent gas flux measurements below the air-water interface of a grid-stirred tank*. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 35, n. 8, p. 1957-1968.
- DANKWERTS, P. V. (1951). *Significance of liquid-film coefficients in gas absorption*. Industrial and Engineering Chemistry, v. 43, n. 6, p. 1460-1467, Jun.
- HERLINA; JIRKA, G. H. (2004). *Application of LIF to investigate gas transfer near the air-water interface in a grid-stirred tank*. Experiments in Fluids, v. 37, p. 341-349.
- HIGBIE, R. (1935). *The rate of absorption of a pure gas in a still liquid during short periods of exposure*. American Institute of Chemical Engineers, v. 31, p. 365-390.
- HOPFINGER, E. J.; TOLY, J. A. (1976). *Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces*. Journal of Fluid Mechanics, v. 78, p. 155-175.
- LAMONT, J. C.; SCOTT, D. S. (1970). *An eddy cell model of mass transfer into the surface of a turbulent liquid*. AIChE Journal, v. 16, n. 4, p. 513-519.
- LEWIS, W. K.; WHITMAN, W. G. (1924). *Principles of gas absorption*. Industrial and Engineering Chemistry, v. 16, p. 1215-1220, Dec.
- MEDINA, P.; SÁNCHEZ, M. A.; REDONDO, J. M. (2001). *Grid stirred turbulence: Applications to the initiation of sediment motion and lift-off studies*. Phys. Chem. Earth, v. 26, n. 4, p. 299-304.
- SCHULZ, H. E.; SCHULZ, S. A. G. (1991). *Modelling below-surface characteristics in water reaeration*. In: *Water Pollution: Modelling, Measuring and Prediction*, Southampton, England, p. 441-454.
- THOMPSON, S. M.; TURNER, J. S. (1975). *Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid*. Journal of Fluid Mechanics, v. 67, p. 349-368.
- VAUGHAN, W. M.; WEBER, G. (1970). *Oxygen quenching of pyrenebutyric acid fluorescence in water. A dynamic probe of the microenvironment*. Biochemistry, v. 9, p. 464-473.
- WOODROW, P. T.; DUKE, S. R. (2001). *Laser-induced fluorescence studies of oxygen transfer across un-sheared flat and wavy air-water interfaces*. Ind. Eng. Chem. Res., v. 40, p. 1985-1995.

### Details of Air-Water Gas Transfer

#### ABSTRACT

*Detailed experiments have been conducted to obtain information on the basic principles involved in the mechanism of interfacial gas transfer under liquid-side control. Planar concentration fields of the dissolved oxygen near the air-water interface have been quantified in an oscillating-grid tank using the laser induced fluorescence (LIF) technique. The high data resolution reveals the concentration distribution within the concentration boundary layer which is only a few millimeters thick. The measured concentration fields allow the observation of the surface renewal phenomenon. Vertical profiles of mean concentration and fluctuation intensity were obtained from the concentration fields. These profiles supply relevant information to apply models developed to the interface.*

*Key-words: interfacial gas transfer; laser induced fluorescence; oscillating-grid tank; turbulence.*