

## Reoxigenação Superficial e Sumidouro Físico de Oxigênio Dissolvido em um Tanque Agitado por Jatos

Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves<sup>1</sup>; Daniel Jadyr Leite Costa<sup>1</sup>; Alexandre Silveira<sup>2</sup>; Marcius F. Gioretti<sup>3</sup>  
julio@icte.uftm.edu.br; danielcosta.geo@gmail.com; alexandre.silveira@unifal-mg.edu.br; marciusg@sc.usp.br

Recebido: 05/01/13 – revisado: 27/03/13 – aceito: 26/04/13

---

### RESUMO

A transferência de oxigênio através da interface ar-água é um importante processo que ocorre em sistemas ambientais como rios, córregos, lagos e estações de tratamento de esgotos. No presente trabalho, visou-se avançar no entendimento dos princípios básicos envolvidos no fenômeno, através de ensaios de reoxigenação realizados em escala de laboratório. Investigou-se a presença de sumidouro físico de oxigênio dissolvido, em um tanque agitado por jatos, provocado pelo próprio sistema de recirculação da água. A metodologia usada é baseada na comparação do desempenho do modelo clássico e de um novo modelo, no qual um termo de primeira ordem é inserido na equação diferencial para quantificar o sumidouro. Os resultados mostraram que o modelo clássico apresentou desempenho inferior quando comparado com o novo modelo. A utilização do modelo clássico, não considerando o sumidouro físico, produz uma estimativa superestimada do coeficiente de reoxigenação superficial. Em média, esse valor é aumentado em 19%.

**Palavras-chave:** Reoxigenação superficial. Tanque agitado por jatos e sumidouro de oxigênio dissolvido.

---

### INTRODUÇÃO

A transferência de gases através da interface ar-água constitui uma importante etapa dos ciclos biogeoquímicos de numerosas substâncias (hélio, nitrogênio, carbono e oxigênio) e, por isso, é frequentemente necessária em muitos campos da ciência e engenharia (Janzen et al., 2008). O oxigênio dissolvido (OD) tem sido objeto de debate constante, já que dentre as variáveis de qualidade da água, é a grandeza mais importante e complexa. Por se constituir em um ecossistema, um corpo d'água natural como, por exemplo, um rio, apresenta diversos componentes físicos, químicos e biológicos que consomem e produzem o oxigênio em um processo dinâmico. Além do consumo devido à oxidação dos resíduos orgânicos presentes naturalmente no corpo d'água, o oxigênio pode ser removido da água pela respiração dos seres aquáticos, por difusão e oxidação do metano na camada aeróbia do sedimento, e pelo processo de *stripping* ocasionado pela ascensão na coluna d'água das bolhas de gases produzidos na

camada anaeróbia do sedimento. Sua reposição se dá ou pela fotossíntese das plantas aquáticas ou através do contato da superfície do corpo d'água com a atmosfera, sendo esse último processo muito mais significativo, podendo ser considerado, principalmente para rios, como o agente efetivamente responsável pela reposição do oxigênio na água. A reoxigenação superficial é o processo de troca de oxigênio entre a atmosfera e um volume de água em contato com ela. Esse processo é quantificado pelo coeficiente de reoxigenação superficial  $K_2$  (tempo<sup>-1</sup>).

Os modelos matemáticos utilizados para a simulação da qualidade da água em rios são uma importante ferramenta da gestão dos recursos hídricos. Dentre os parâmetros que compõem esses modelos, o  $K_2$  é considerado o mais relevante, uma vez que ele quantifica indiretamente a capacidade de um corpo d'água recuperar-se, em termos de concentração de oxigênio dissolvido, após receber cargas poluidoras. Estudos, realizados desde o início do século XX, revelaram que o processo de reoxigenação superficial é normalmente analisado como uma função dos parâmetros hidráulicos do escoamento e de diversos fatores ambientais como temperatura da água, salinidade, pressão atmosférica, umidade relativa do ar e concentração de surfactantes (GUALTIERI et al., 2002; VACHON et al., 2010; SILVEIRA; GIORGETTI, 2007; JAMNONGWONG, 2010).

---

<sup>1</sup> Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM

<sup>2</sup> Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL

<sup>3</sup> Departamento de Hidráulica e Saneamento EESC-USP

O balanço de oxigênio dissolvido, de um corpo de água, na ausência de sumidouros e considerando-se como fonte apenas a reoxigenação superficial, é geralmente representado, pela equação 1.

$$V \frac{dC}{dt} = K_L A (C_s - C) \quad (1)$$

em que  $V$  = volume do corpo d'água,  $A$  = área da interface ar-água,  $C$  = concentração de OD,  $C_s$  = concentração de saturação de OD,  $K_L$  = coeficiente de transferência de massa de OD, e  $t$  = tempo.

Dividindo os dois termos da equação 1 por  $V$  e dada a condição inicial  $C(0) = C_0$ , obtém-se o modelo clássico:

$$C(t) = C_s + (C_0 - C_s) \exp\left(-\frac{K_L A}{V} t\right) \quad (2)$$

em que  $C_0$  = concentração inicial de OD. A relação  $K_L A/V$  é igual a  $K_2$ . O  $K_L$  depende da turbulência da água, e diferentes modelos conceituais foram desenvolvidos para explicar a estrutura dessa dependência (Lewis e Whitman, 1924; Higbie, 1935; Dankwerts, 1951; Schulz e Schulz, 1991). No entanto, a aplicação de modelos conceituais exige a mensuração de parâmetros relevantes que, por sua vez, nem sempre são facilmente mensuráveis. Essa dificuldade está associada ao fato de a transferência de massa ser extremamente complexa (Janzen et al., 2008). 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 diversos sistemas de agitação da água para o estudo da turbulência e do processo de reoxigenação superficial. Dentre esses sistemas, destacam-se: tanques com grades oscilantes, tanques com agitadores mecânicos tipo turbina, canais hidráulicos com recirculação e tanques com água agitada por jatos. Detalhes desses sistemas são encontrados nos trabalhos realizados por Herlina e Jirka (2008), Law e Khoo (2002), Pinheiro (2011) e Szeliga e Roma (2009).

Para a realização dos estudos de reoxigenação superficial nesses sistemas de agitação, a hipótese de ausência de sumidouro de oxigênio é adotada. Desta forma, a equação 2 é utilizada para a estimativa de  $K_L$  e, conseqüentemente,  $K_2$ . Entretanto, estudos recentes investigaram e confirmaram a presença de sumidouro físico de oxigênio dissolvido em tanques com agitador mecânico tipo turbina e em ca-

nais hidráulicos com recirculação (Silveira, 2004; Pinheiro, 2011). O sumidouro pode ser causado por zonas de baixa pressão em que parte dos gases dissolvidos pode migrar para a fase gasosa, ocorrendo a formação de microbolhas que se desprendem e são levadas de volta à atmosfera, constituindo-se, portanto, em sumidouro de oxigênio dissolvido. Em um agitador mecânico tipo turbina, pode haver formação de vórtices nas bordas das pás do rotor. Esses vórtices possuem zonas de baixa pressão no seu centro. Em canais com recirculação, as zonas de baixa pressão podem ocorrer na linha de sucção da bomba.

Erros significativos na estimativa de  $K_2$  são produzidos quando não se considera a existência de sumidouro de oxigênio dissolvido. Os valores de  $K_2$ , em média, podem ser superestimados em 52,7%, conforme verificado por PINHEIRO (2011).

Esse trabalho tem como objetivo investigar a existência de sumidouro de oxigênio dissolvido em um tanque agitado por jatos. Para tanto, os dados resultantes dos ensaios de reoxigenação são analisados com o modelo clássico apresentado na equação 2 e com um novo modelo que considera, na sua formulação, a existência de sumidouro de oxigênio dissolvido.

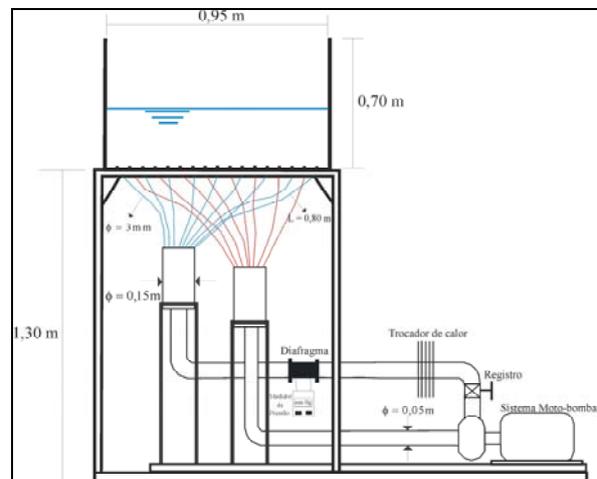


Figura 1 - Desenho esquemático do tanque utilizado no estudo de reoxigenação

## MATERIAL E MÉTODOS

### Sistema de agitação da água

O estudo de reoxigenação superficial foi realizado em um tanque cuja massa de água é agitada por jatos (Figura 1). O tanque de PRFV (Plástico

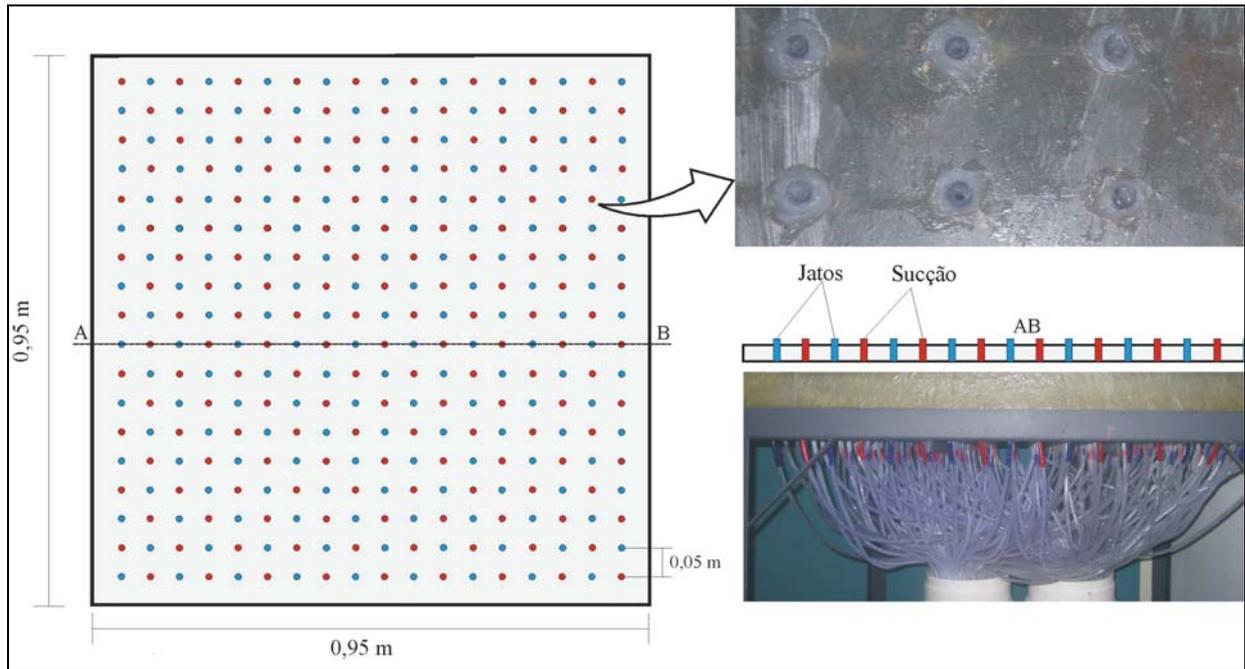


Figura 2 - Arranjo dos dispositivos de entrada e saída de água do tanque

Reforçado com Fibra de Vidro), construído com base quadrada, apresenta 70 cm de altura e área da base de 95 cm x 95 cm. O emprego do PRFV na construção do tanque elimina a necessidade de se executar qualquer correção que leve em conta as perdas do oxigênio em função da oxidação de materiais.

A quantidade total de água utilizada para os ensaios foi de 270,8 L. Portanto, o nível da água, medido desde a base do tanque, foi de 30 cm no início de cada teste. A lâmina de água evaporada durante os ensaios, que duram até 15 horas, foi determinada pelo monitoramento do rebaixamento da superfície livre com o uso de um sonar instalado sobre o tanque. O sistema de agitação da água é introduzido pela parte inferior do tanque. Esse arranjo foi possível devido à utilização de uma estrutura metálica com 1,30 m de altura.

A recirculação da água foi realizada com um conjunto moto-bomba de 1,5 cv de potência. A água é alimentada pelo fundo do tanque através de 324 mangueiras, cada uma com 3 mm de diâmetro interno e 80 mm de comprimento, regularmente espaçadas em 5 cm, por onde a água é injetada e sucionada (Figura 2). Essa configuração resultou em uma vazão igual a zero no plano horizontal, paralelo ao fundo do tanque.

As mangueiras de sucção e injeção convergem para tubulações de PVC de 150 mm de diâme-

tro, as quais estão conectadas nas linhas de sucção e recalque, respectivamente. Para obtenção de diferentes condições de turbulência, foi instalado na tubulação de recalque um registro que, em função do seu grau de abertura, causa diferentes níveis de dissipação de energia e, conseqüentemente, velocidades dos jatos.

A vazão de recirculação foi medida com o uso de um diafragma, com 32,2 mm de diâmetro, calibrado e instalado na tubulação de recalque.

Para evitar o aumento da temperatura da massa de água, devido ao cisalhamento originado pelo escoamento nas tubulações, foi utilizado um trocador de calor do tipo serpentina (Figura 3). O trocador é constituído por uma caixa térmica, de 50 cm de altura e área de seção transversal de 50 cm x 50 cm, e três serpentinas de cobre com 4 m de comprimento e 16 mm de diâmetro, por onde a energia térmica é transferida. A entrada e a saída do trocador de calor são compostas por caixas de distribuição, dianteira e traseira, pelas quais a água entra e sai das serpentinas, respectivamente. Água e pedaços de gelo, com volume de 600 mL, foram utilizados como fluido refrigerante. No fundo da caixa térmica foi instalado um dreno, que permite a troca do fluido refrigerante em intervalos de aproximadamente 1 hora.

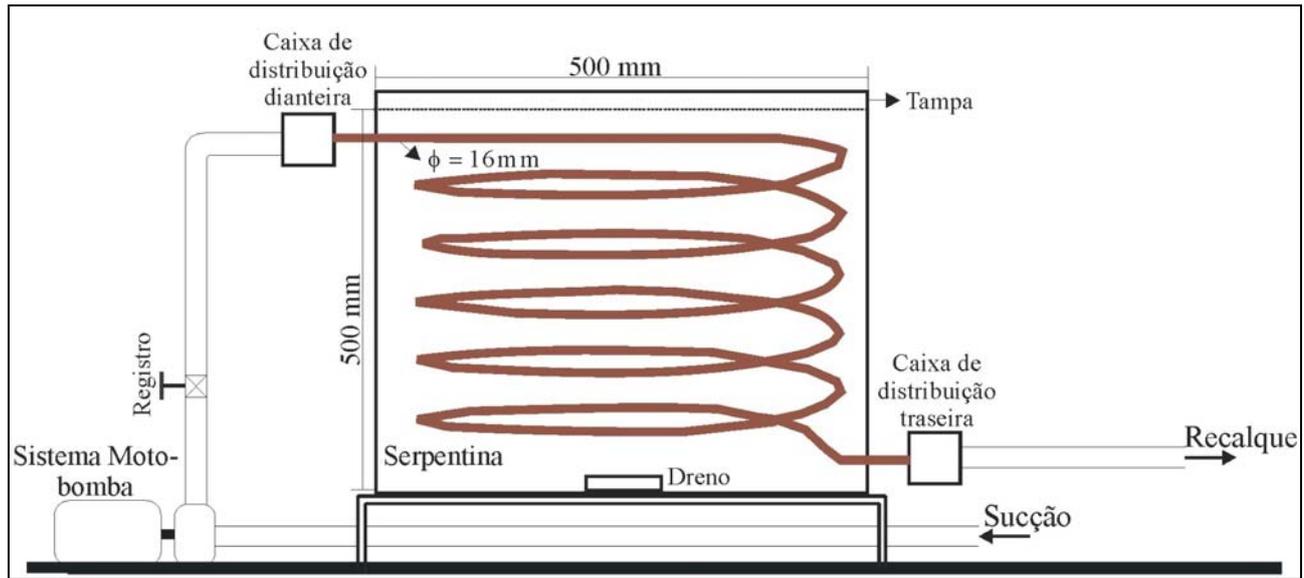


Figura 3 - Desenho esquemático do trocador de calor usado no estudo

Os ensaios foram realizados em cinco vazões de recirculação diferentes 1,63, 2,04, 2,38, 2,68 e 2,95 L.s<sup>-1</sup>, causando variações nas velocidades dos jatos de 1,42 a 2,57 m.s<sup>-1</sup>.

A hidrodinâmica de um tanque agitado por jatos, como o apresentado, possui quatro regiões características: 1- Região inferior, onde zonas de elevada turbulência (região de injeção dos jatos) são cercadas por zonas de baixa turbulência; 2- Zona central, onde há uma interação direta dos jatos; 3- Zona de turbulência isotrópica; e 4- Camada influenciada pela superfície. Os limites de cada zona dependem das velocidades dos jatos. O início da região isotrópica é definido por Tamburrino e Aravena (2002), equação 3, que construíram um tanque dimensionalmente idêntico ao produzido nesse estudo.

$$\frac{Y_0}{X} = 0,634 \left( \frac{V_j L_c}{\nu} \right)^{0,154} \quad (3)$$

em que X é a distância entre os jatos, V<sub>j</sub> é a velocidade do jato, L<sub>c</sub> = √πd<sub>i</sub>/2 é o comprimento característico, ν é a viscosidade cinemática do fluido, e d<sub>i</sub> é o diâmetro interno da mangueira onde o jato é produzido. A intensidade turbulenta na zona isotrópica (U<sub>0</sub>) em Y<sub>0</sub> é igual a (Tamburrino e Aravena, 2002):

$$\frac{U_0}{V_j} = 0,194 \left( \frac{V_j L_c}{\nu} \right)^{-0,318} \quad (4)$$

Considerando-se os parâmetros hidrodinâmicos e geométricos definidos por Tamburrino e Aravena (2002), o número de Reynolds no início da região isotrópica é definido como:

$$Re_y = \frac{U_0 Y_0}{\nu} \quad (5)$$

O resumo das condições hidrodinâmicas usadas nesse estudo é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Condições hidrodinâmicas estabelecidas no tanque agitado por jatos

Q [L.s <sup>-1</sup> ]	V <sub>j</sub> [m.s <sup>-1</sup> ]	U <sub>0</sub> [cm.s <sup>-1</sup> ]	Y <sub>0</sub> [cm]	Re <sub>y</sub> [-]
1,63	1,42	2,01	22,53	4514,7
2,04	1,78	2,34	23,33	5453,5
2,38	2,08	2,61	23,89	6208,4
2,68	2,34	2,83	24,33	6853,2
2,95	2,57	3,02	24,69	7422,9

### Ensaio de reoxigenação superficial

Os valores de K<sub>2</sub> foram determinados através de um total de quinze ensaios. Para tanto, segui-

ram-se os procedimentos descritos abaixo: 1. O tanque foi abastecido com água proveniente da rede pública até que a lâmina d'água atingisse 30 cm; 2. Após ajustar o registro de modo a obter a vazão de recirculação desejada, o trocador de calor era abastecido com água e gelo; 3. O sensor de OD era instalado; 4. O oxigênio era removido da água; 5. Iniciava-se o processo de reoxigenação e coleta dos dados de concentração de oxigênio dissolvido.

As medidas de oxigênio dissolvido foram realizadas com o uso de um oxímetro, que utiliza processos de luminescência e registra automaticamente os dados. O oxímetro foi calibrado utilizando o método químico de Winkler. Além de medir a concentração de oxigênio dissolvido, o oxímetro também registra a temperatura da água.

A água foi desoxigenada com o uso de sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3 + 1/2\text{O}_2 \leftrightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4$ ), de modo que a concentração de OD atingisse valores inferiores a 2  $\text{mg.L}^{-1}$ .

Os ensaios de reoxigenação produziram curvas de concentração de OD em função do tempo. O ajuste dos modelos aos dados é realizado através da análise de regressão não linear, conforme sugerido por ASCE (2007).

#### Sumidouro de oxigênio dissolvido em sistemas de agitação

A concentração de saturação de OD ( $C_s$ ) é afetada por diversos fatores ambientais. Em relação à modelagem da qualidade da água, os fatores mais importantes são a temperatura da água, a pressão atmosférica (ou altitude) e a salinidade. De acordo com Gonçalves (2011),  $C_s$  teórico pode ser estimado por inúmeras equações que começaram a ser desenvolvidas na década de 60. Um resumo das características dessas equações é apresentado no trabalho realizado por McCutcheon (1989).

Os valores de  $C_s$  determinados experimentalmente pelo ajuste do modelo aos dados (análise de regressão não linear) são, geralmente, inferiores aos valores teóricos calculados, através das equações existentes, para as condições de temperatura, salinidade e pressão em que os experimentos foram realizados. Esse fato interfere significativamente na determinação do  $K_2$  obtido através do experimento de reoxigenação.

Nesse trabalho, considera-se a hipótese de que o problema descrito anteriormente está vinculado à inadequação do modelo clássico, equação 2, utilizado para a determinação dos parâmetros envolvidos no fenômeno de reoxigenação superficial. O modelo clássico não prevê a existência de um su-

midouro de OD, que, caso seja considerado, justificaria a redução dos valores de  $C_s$  encontrados experimentalmente, em relação aos valores calculados pelas equações existentes na literatura.

Em estudos realizados em laboratórios, os pesquisadores consideram que, por se tratar de água "limpa", não exista nenhum tipo de sumidouro, químico ou biológico, de OD. No entanto, não atentam para a possibilidade da existência de um sumidouro físico, provocado pelos equipamentos responsáveis pela agitação e ou recirculação do líquido em estudo. Por isso, Silveira (2004) sugeriu a inserção de um novo parâmetro no modelo clássico, com a responsabilidade de representar o possível sumidouro. Esse parâmetro é proporcional a concentração de oxigênio dissolvido:

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C_s - C) - K_3C \quad (6)$$

A solução da equação 6, dada a condição inicial  $C(0) = C_0$ , é:

$$C(t) = \frac{K_2}{K_2 + K_3} C_s - \left( \frac{K_2}{K_2 + K_3} C_s - C_0 \right) \exp(-(K_2 + K_3)t) \quad (7)$$

em que  $K_3$  é o coeficiente de desoxigenação, com a mesma unidade de  $K_2$ , ou seja, o inverso do tempo.

Considerando-se a possibilidade da existência de sumidouro nos ensaios, os dados coletados de oxigênio dissolvido foram analisados com o uso dos dois modelos: clássico (equação 2) e com sumidouro (equação 7). Contudo, o ajuste do modelo com sumidouro aos dados é realizado através da análise de regressão não linear, variando-se os parâmetros  $K_2$ ,  $K_3$  e  $C_0$ . O valor de  $C_s$  teórico é determinado, em função da temperatura da água ( $T$ ) e pressão atmosférica (altitude), pela equação desenvolvida por Popel (1979), citada por Von Sperling (2007).

$$C_s = (14,652 - 4,1022 \cdot 10^{-1} T + 7,9910 \cdot 10^{-3} T^2 - 7,7774 \cdot 10^{-5} T^3) [1 - (\text{Altitude}/9450)] \quad (8)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

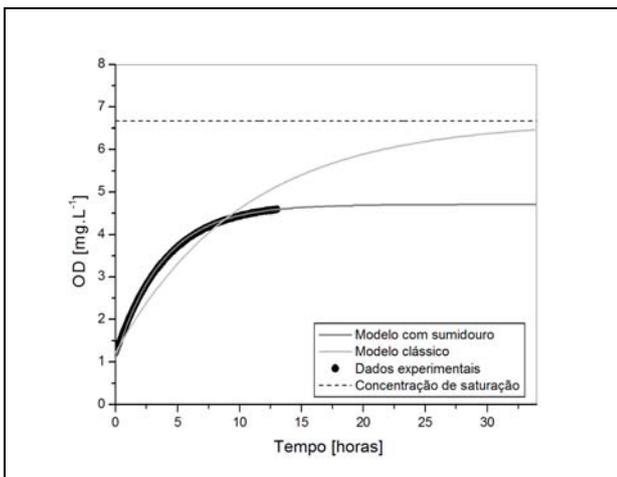
As condições experimentais nas quais os ensaios de reoxigenação foram realizados estão apresentadas na Tabela 2. A temperatura média da água

variou entre 27,3°C (ensaio 3) e 32,5°C (ensaio 1). A maior lâmina evaporada ocorreu no ensaio 1, causando uma redução de 1,3% do volume de água no tanque, e as menores nos ensaios 4 e 10 com lâmina evaporada de 1 mm. A altitude foi considerada constante e igual a 790 m.

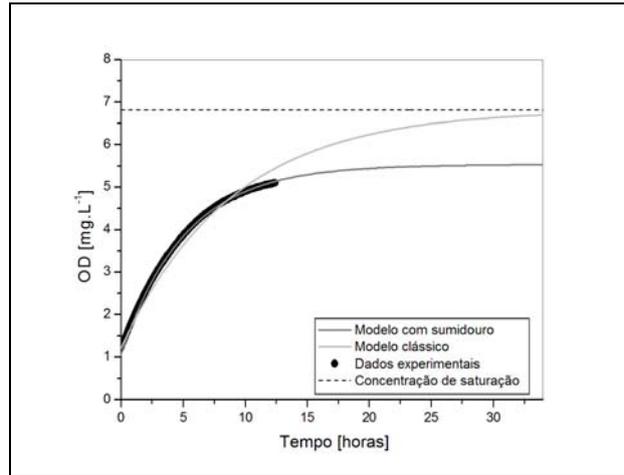
**Tabela 2 - Condições experimentais dos ensaios**

Ensaio	Rey [-]	T <sub>ar</sub> [°C]	T <sub>água</sub> [°C]	Lâmina Evaporada [mm]
1	4514,7	29,6	32,5	4,0
2	4514,7	29,0	32,4	3,0
3	4514,7	24,8	27,3	3,0
4	5453,5	23,8	30,4	1,0
5	5453,5	25,0	30,4	2,0
6	5453,5	23,0	29,3	3,0
7	6208,4	26,3	29,7	3,0
8	6208,4	28,1	31,2	3,0
9	6208,4	26,2	29,9	2,0
10	6853,2	26,5	30,1	1,0
11	6853,2	28,1	31,1	2,0
12	6853,2	25,4	29,7	2,0
13	7422,9	24,8	30,9	2,0
14	7422,9	24,0	29,6	2,0
15	7422,9	25,0	30,2	3,0

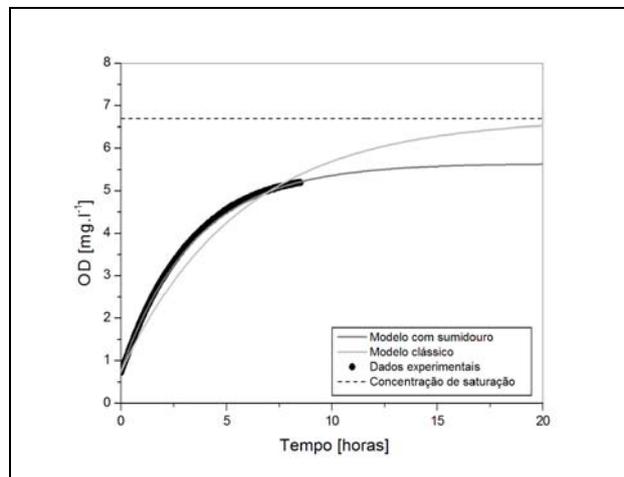
Para cada nível de agitação, quantificado pelo número de Reynolds, três ensaios foram realizados. Nas Figuras 4, 5 e 6, três ensaios são apresentados como forma de exemplificar o processo de reoxigenação.



**Figura 4 - Ensaio de reoxigenação superficial número 8**



**Figura 5 - Ensaio de reoxigenação superficial número 9**



**Figura 6 - Ensaio de reoxigenação superficial número 13**

Os dados experimentais são representados por pontos discretos, o modelo clássico (equação 2) é representado pela linha contínua cinza claro e o modelo com sumidouro (equação 7) é representado pela linha contínua cinza escuro. A linha tracejada representa a concentração de saturação obtida pela equação 8. O efeito da salinidade não é considerado nessa equação; entretanto, conforme afirmado pela EPA (1985), para modelagem em rios esse parâmetro pode ser desprezado. Nesse primeiro momento, tanto para o modelo clássico quanto para o modelo com sumidouro, o valor de  $C_s$  é fixo e determinado com o uso da equação 8. Os parâmetros restantes dos modelos,  $C_0$ ,  $K_2$  e  $K_3$ , são estimados pela análise de regressão não linear.

Os resultados mostram claramente a existência de um sumidouro de oxigênio dissolvido, já que, mesmo visualmente, é possível observar que o

modelo com sumidouro ajustou-se melhor aos dados do que o modelo clássico. Resultados semelhantes foram obtidos por Silveira (2004) e Pinheiro (2011). Os desempenhos dos modelos aos dados foram avaliados pelos métodos da raiz quadrada do erro quadrático médio (*RMSE*) e do erro multiplicativo médio (*MME*), equações 9 e 10, respectivamente. O último foi apresentado e aplicado por Moog e Jirka (1998) no estudo de equações empíricas para a determinação do  $K_2$  em rios.

$$RMSE = \left( \sum_{i=1}^N \frac{(y_p - y_m)^2}{N} \right)^{1/2} \quad (9)$$

em que  $N$  é o número de medidas,  $y_p$  são os valores preditos e  $y_m$  os valores medidos. O modelo apresenta elevado desempenho se os valores preditos são próximos aos valores medidos.

$$MME = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^N \left| \ln \left( \frac{y_p}{y_m} \right) \right|}{N} \right] \quad (10)$$

Os valores médios obtidos para ambos os métodos, para cada número de Reynolds, mostram que o modelo com sumidouro apresentou resultado mais satisfatório do que o modelo clássico (Tabela 3).

Tabela 3 - Avaliação do desempenho do modelo

Rey [-]	RMSE [mg.L <sup>-1</sup> ]	MME [mg.L <sup>-1</sup> ]
<i>Modelo Clássico</i>		
4514,7	0,0773	1,020
5453,5	0,0947	1,014
6208,4	0,2113	1,055
6853,2	0,1096	1,021
7422,9	0,1642	1,028
<i>Modelo com Sumidouro</i>		
4514,7	0,0077	1,002
5453,5	0,0164	1,002
6208,4	0,0296	1,008
6853,2	0,0185	1,004
7422,9	0,0316	1,005

Destaca-se que quanto menor o valor de *RMSE* e mais próximo *MME* estiver da unidade, melhor é o ajuste do modelo aos dados experimentais.

Ainda como forma de expressar os resultados do estudo comparativo do modelo clássico com

o modelo com sumidouro, nas Figuras 7 e 8 é utilizada a razão  $OD_{\text{modelo}}/OD_{\text{dados}}$  como critério de comparação. Nessas Figuras, as melhores previsões são aquelas cujos valores estão distribuídos mais próximo da relação  $OD_{\text{modelo}}/OD_{\text{dados}} = 1$ . Novamente, fica evidenciada a superioridade do modelo com sumidouro, uma vez que em praticamente todos os ensaios o valor dessa relação está bem próximo de 1, diferentemente do que acontece com o modelo clássico. Os ensaios 8 e 13 foram os que apresentaram os maiores desvios.

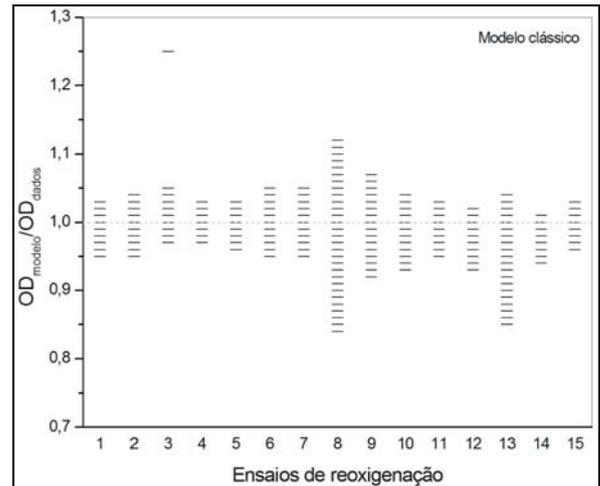


Figura 7 - Razão de OD estimado pelo modelo clássico e medido com o oxímetro

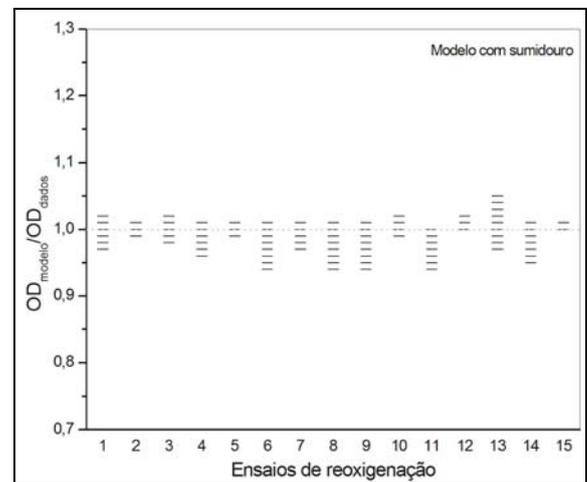


Figura 8 - Razão de OD estimado pelo modelo com sumidouro e medido com o oxímetro

Prosseguindo com o objetivo de avaliar a existência do sumidouro de oxigênio, um novo procedimento foi adotado. Agora, o valor de  $C_s$  é esti-

mado pela análise de regressão não linear com o uso do modelo clássico. Dessa forma, os parâmetros estimados pela análise de regressão são  $C_0$ ,  $C_s$  e  $K_2$ . Como essa análise é puramente matemática, o ajuste fornece valores que melhor ajustam a função aos dados experimentais, sem considerar qualquer condição de natureza física. Os valores de  $C_s$  estimados pela análise de regressão não linear,  $C_s^*$ , são comparados graficamente com os valores de  $C_s$  obtidos com a equação 8. Na Figura 9 é possível observar que nos quinze ensaios, os valores de  $C_s^*$  são inferiores aos valores de  $C_s$ .

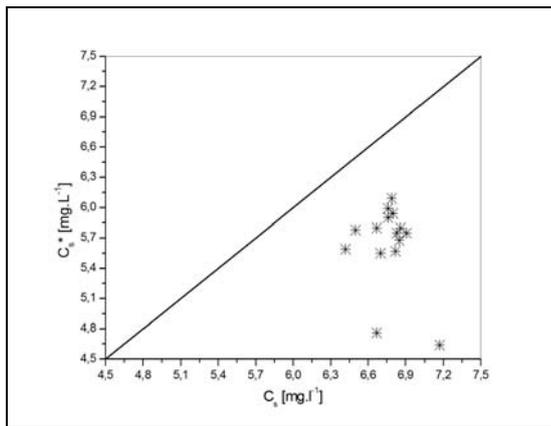


Figura 9 - Comparação entre os valores de  $C_s^*$  e  $C_s$

Os resultados dos ensaios deveriam prever valores  $C_s^*$  aproximadamente iguais aos valores determinados pela equação 8, fato não verificado. Isso comprova, na ausência de sumidouros químicos e biológicos, a presença de sumidouros físicos causados pelo próprio processo experimental, uma vez que não há explicação teórica que justifique a diferença entre  $C_s$  e  $C_s^*$ . Em média, o valor da concentração de saturação estimado pela análise de regressão não linear foi de 16,6% menor que o valor da concentração de saturação estimado pela equação 8. A redução encontrada por Pinheiro (2011) foi de 16,7%. O sumidouro pode ocorrer na linha de sucção da bomba, pois as zonas de baixa pressão no fluido podem causar a migração de parte dos gases dissolvidos para a fase gasosa. Para validar essa hipótese, Pinheiro (2011) mostrou a existência de uma correlação linear entre a queda de pressão na linha de sucção e o valor do  $K_3$  introduzido no modelo clássico.

Os valores de  $K_2$  obtidos com o uso do modelo clássico e os valores de  $K_2$  e  $K_3$  obtidos com o uso do modelo com sumidouro são apresentados na Tabela 4. Eles foram corrigidos, com a equação 11,

para a temperatura de 20°C, que nesse estudo foi utilizada como padrão.

$$K_2(T) = K_2(20) 1,024^{(T-20)} \tag{11}$$

em que T é a temperatura da água (°C).

O  $K_3$  mostrou-se independente do nível de agitação da água. Resultado diferente foi obtido por Silveira (2004), o qual encontrou uma relação de proporcionalidade entre  $K_3$  e a velocidade de rotação de um agitador mecânico tipo turbina. Segundo esse autor, o sumidouro de oxigênio tem origem na formação dos vórtices, que é uma função da velocidade de rotação. Por conseguinte,  $K_3$  é função da velocidade de rotação.

Tabela 4 - Valores médios de  $K_2$  e  $K_3$  para a temperatura corrigida de 20°C

Rey [-]	$K_2$ (20°C) [hora <sup>-1</sup> ]	$K_3$ (20°C) [hora <sup>-1</sup> ]
<i>Modelo Clássico</i>		
4514,7	0,11	-
5453,5	0,16	-
6208,4	0,16	-
6853,2	0,17	-
7422,9	0,21	-
<i>Modelo com Sumidouro</i>		
4514,7	0,09	0,024
5453,5	0,11	0,020
6208,4	0,13	0,041
6853,2	0,15	0,025
7422,9	0,17	0,042

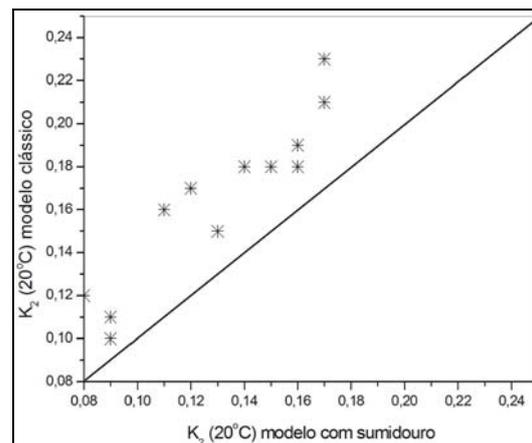


Figura 10 - Comparação entre os valores de  $C_s^*$  e  $C_s$

Na Figura 10, os valores de  $K_2$  obtidos com o uso do modelo clássico são comparados com os valores de  $K_2$  obtidos com o uso do modelo com sumi-

douro. Observa-se que a presença do sumidouro faz com que o modelo clássico superestime o valor do  $K_2$ . Em média, esse valor é aumentado em 19%.

## CONCLUSÕES

A transferência de oxigênio dissolvido através da interface ar-água foi estudada experimentalmente em um tanque agitado por jatos utilizando uma sonda para a medida da concentração de oxigênio dissolvido. Os resultados mostraram que o modelo clássico usado para descrever o processo de reoxigenação superficial apresentou desempenho inferior quando comparado com o novo modelo que considera a existência de um sumidouro físico, provocado pelo próprio sistema de agitação da água. O  $C_s$  estimado pela análise de regressão não linear com o uso do modelo clássico,  $C_s^*$ , foi, em média, 16,6% menor que o valor de  $C_s$  teórico, determinado em função da temperatura e pressão atmosférica. A utilização do modelo clássico, não considerando o sumidouro físico, produz uma estimativa superestimada do  $K_2$ . Avanços no entendimento dos fenômenos que ocorrem junto às interfaces ar-água são obtidos pelo uso de sistemas de agitação da água como, por exemplo, os tanques agitados por jatos. Por isso, a quantificação da influência dos sistemas de agitação sobre o processo de reoxigenação superficial é um importante avanço no entendimento do fenômeno de transferência de oxigênio em escala de laboratório. Recomenda-se que a investigação da presença de sumidouro físico seja considerada uma etapa adicional nos estudos de transferência de oxigênio dissolvido em sistemas de agitação da água, uma vez que os parâmetros estimados podem estar subestimados e superestimados, como foi o caso desse estudo em relação à  $C_s$  e  $K_2$ , respectivamente.

## REFERÊNCIAS

- ASCE. *ASCE Standard - Measurement of Oxygen in Clear Water*, ASCE/SEI 2-06, Reston, Virginia, 2007.
- DANKWERTS, P. Significance of liquid film coefficients in gas absorption. *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 43, n. 6, p. 1460-1467, 1951.
- EPA, United States Environmental Protection Agency. *Rates, Constants, and Kinetics Formulations in*
- Surface Water Quality Modeling. 2ª ed. Athens, 1985, 455p.
- GONÇALVES, J. C. S. I.; SARDINHA, D. S.; BOESSO, F. F. Modelo Numérico para a Simulação da Qualidade da Água do Rio Jaú (SP). *Revista de Estudos Ambientais*, v. 13, n.2, p. 44-56, 2011.
- GUALTIERI, C.; GUALTIERI, P.; DORIA, G. P. Dimensional Analysis of Reaeration Rate in Streams. *Journal of Environmental Engineering*, 128, n. 1 jan., 2002.
- HERLINA, JIRKA; G. H. Experiments on Gas Transfer at the Air-Water Interface Induced by Oscillating Grid Turbulence, *Journal Fluid Mech*, v. 594, p. 183-208, 2008.
- 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.
- JAMNONGWONG, M. et al. Experimental Study of Oxygen Diffusion Coefficients in Clean Water Containing Salt, Glucose or Surfactant: Consequences on the Liquid-Side Mass Transfer Coefficients. *Chemical Engineering Journal*, v. 165, 758-768, 2010.
- JANZEN, G. J; SCHULZ, H. E.; LAMON, A. W. Medidas da Concentração de Oxigênio Dissolvido na Superfície da Água. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 13, n. 3, 2008.
- LAW, C. N. Z.; KHOO, B. C. Transport Across a Turbulent Air-Water Interface. *AIChE Journal*, v. 48, n. 9. 2002.
- LEWIS, W.; WHITMAN, W. Principles of gas absorption. *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 16, n. 12, p. 1215-1220, 1924.
- MCCUTCHEON, S. C. *Water Quality Modeling: Transport and Surface Exchange in Rivers*. CRC Press, 1989, 334p.
- MOOG, D.; JIRKA, G. H. Analysis of Reaeration Equations Using Mean Multiplicative Error. *Journal of Environmental Engineering*, v. 124, n.2, p.104-110, 1998.
- PINHEIRO, H. D. Reoxigenação Superficial da Água em Canais Abertos: o Efeito da Recirculação Produzida por Bombeamento. 2011. Tese (Doutorado) -

Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011

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, 1991, p. 441-454.

SILVEIRA, A. Influência da Umidade Atmosférica sobre o Mecanismo de Transferência de Gases Através da Interface Água-Atmosfera. 2004. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

SILVEIRA, A.; GIORGETTI, M. F. Determinação do Tempo de Ensaio para a Determinação do Coeficiente de Reoxigenação Superficial em Laboratório Utilizando Tanques com Agitação Mecânica, XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, São Paulo, 2007.

SZELIGA, M. R.; ROMA, W. N. L. Estudos de Reaeração com Velocimetria por Imagens de Partículas-Sistema S-PIV-3D. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 14, n. 4, 2009.

TAMBURRINO, A.; ARAVENA, C. Reaeration Coefficient Determined from Agitated Water Tank Experiments, ICHE - INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDRO-SCIENE AND ENGINEERING, Warsaw, Poland, 2002.

VACHON, D.; PRAIRIE, Y. T.; COLE, J. J. The Relationship between Near-Surface Turbulence and Gas Transfer Velocity in Freshwater Systems and its Implications for Floating Chamber Measurements of Gas Exchange. *Limnol. Oceanogr.*, v. 55, n. 4, 2010.

VON SPERLING, M. *Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios*. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento, UFMG, 2007.

### ***Surface Reoxygenation And Physical Sink Of Dissolved Oxygen In A Jet-Agitated Vessel***

#### ***ABSTRACT***

Gas Transfer across the air-water interface is an important process that occurs in environmental systems, such as rivers, streams, lakes and sewage treatment plants. In the present research, the aim

was to advance the understanding of the basic principles involved in the phenomenon through a planned set of experiments. We investigated the existence of a physical sink of dissolved oxygen in a jet-agitated vessel, caused by the agitation system. The methodology is based on evaluating the performance of the classical model and a new model, in which a first-order term is inserted to quantify the sink. The classical model showed inferior performance compared to the new model. The use of the classical model produced an overestimated estimate of the surface reoxygenation coefficient. On average, this value is increased by 19%.

**Keywords:** surface reoxygenation coefficient, jet-agitated vessel and dissolved oxygen sink.