

## IV-093 - AVALIAÇÃO DO MÉTODO DA SONDA ESFÉRICA SOLÚVEL FLUTUANTE PARA A DETERMINAÇÃO DA REAERAÇÃO SUPERFICIAL EM CORPOS D'ÁGUA NATURAIS

### **Murilo de Souza Ferreira<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Mestrando em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

### **Wesley Aparecido Saltarelli<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Ambiental pelo Centro Universitário UNISEB – Estácio. Mestrando em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

### **Nícolas Reinaldo Finkler<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Ambiental pela Universidade de Caxias do Sul. Mestrando em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

### **Carlos Eduardo Kolb Maynardes Araújo de Campos Jordão<sup>(4)</sup>**

Engenheiro Químico pelo Instituto Mauá de Tecnologia. Graduado em Farmácia e Bioquímica pela Universidade de São Paulo. Mestrado em Engenharia Química pela Universidade de São Paulo. Analista A do setor de gestão de laboratórios da Embrapa Pecuária Sudeste.

### **Davi Gasparini Fernandes Cunha<sup>(5)</sup>**

Engenheiro Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP. Pós-doutorado pela EESC/USP. Professor da EESC/USP.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Trabalhador São-Carlense, 400 - Centro - São Carlos - SP - CEP: 13566-590 - Brasil - Tel: +55 (16) 9-8105-9604 - e-mail: Muriloferreira@usp.br

## **RESUMO**

A reaeração superficial é um importante fenômeno físico de inserção do oxigênio atmosférico na massa líquida de um corpo d'água natural. Este fenômeno ocorre principalmente na interface ar-água e pode ser quantificado por um coeficiente de reaeração superficial ( $K_2$ ). O  $K_2$  é um importante parâmetro presente em modelos de qualidade da água, o que implica em uma estimativa confiável deste parâmetro. Este trabalho objetivou calibrar uma nova configuração do método da sonda solúvel flutuante (*i.e.*, formato esférico) e estimar o  $K_2$  de quatro diferentes riachos localizados no município de São Carlos (SP). Para tanto, foram utilizados a técnica do traçador gasoso para a obtenção dos  $K_2$ , e em seguida, o método da sonda esférica solúvel flutuante (SESF) para a obtenção das velocidades de dissolução ( $V_s$ ). O gás traçador utilizado foi o hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ ) e o traçador conservativo foi o cloreto de sódio (NaCl). O lançamento dos traçadores foi realizado por meio do método do *plateau* e a determinação da concentração do  $SF_6$  feita por meio da técnica do *headspace* e cromatografia gasosa. O  $K_2$  foi estimado por meio do coeficiente angular obtido do decaimento da concentração de  $SF_6$  em relação à distância do trecho. A SESF foi confeccionada com ácido oxálico dihidratado por meio da compactação por pressão, e colocada para flutuar sob o curso d'água do riacho no mesmo trecho em que foi empregada a técnica do traçador gasoso. O tempo de percurso da SESF foi cronometrado e o diâmetro medido por meio de um paquímetro. Os valores de  $K_2$  variaram de 15,5 a 548  $dia^{-1}$  e os valores de  $V_s$ , entre 1,68 e 11,14 m/dia. A correlação entre  $K_2$  e  $V_s$  forneceu um bom ajuste linear ( $R^2 = 0,90$ ). Entretanto, nenhuma base teórica e experimental indica que a relação entre a razão de  $K_2$  e  $V_s$  seja constante e independente do nível de turbulência. Conclui-se que o método da SESF possui um elevado potencial, devido à simplicidade e baixo custo. Entretanto, para que se possa atribuir utilidade definitiva a este método, é necessária a calibração em cursos d'água naturais de portes maiores para a determinação das incertezas associadas à correlação entre  $K_2$  e  $V_s$ .

**PALAVRAS-CHAVE:** Coeficiente de reoxigenação, Recursos hídricos, Qualidade da água, Sonda solúvel flutuante.

## INTRODUÇÃO

A transferência de gases através da superfície livre de um recurso hídrico (*i.e.*, interface ar-água) é um fenômeno físico que ocorre nos ciclos biogeoquímicos de diversos elementos (*e.g.*, nitrogênio, carbono, oxigênio), sendo frequentemente aplicada nas áreas da engenharia e das ciências ambientais (JANZEN *et al.*, 2008). Entre os gases dissolvidos em corpos d'água naturais, o oxigênio dissolvido (OD) é um importante parâmetro de qualidade da água, pois a biota aquática aeróbia requer níveis adequados de OD para sobreviver (BENSON *et al.*, 2014).

Em um corpo d'água natural, a reaeração superficial e a fotossíntese são as principais fontes responsáveis por introduzir o OD no meio, porém a demanda bentônica, oxidação de matéria orgânica, respiração pela biota aeróbia, nitrificação e a oxidação química de substâncias podem reduzir o OD disponível.

A reaeração superficial é um fenômeno que ocorre naturalmente em ecossistemas aquáticos, e pode ser quantificada por um coeficiente denominado coeficiente de transferência de massa de oxigênio, ou coeficiente de reaeração ( $K_2$ ). O  $K_2$  é um parâmetro sensível em modelos matemáticos aplicados na gestão dos recursos hídricos, como por exemplo, modelos de autodepuração (*e.g.*, SARDINHA *et al.*, 2008) e metabolismo aquático (*e.g.*, DEMARS *et al.*, 2015), o que demanda uma estimativa confiável deste parâmetro.

Os modelos matemáticos aplicados à gestão da qualidade dos recursos hídricos são capazes de prever, em função das características biológicas, físicas, químicas, hidráulicas e de cargas de águas residuárias lançadas no corpo d'água, os perfis de algumas variáveis de qualidade da água (*e.g.*, OD) ao longo do eixo longitudinal dos sistemas aquáticos. Essa previsão é importante para o gerenciamento dos recursos hídricos, pois por meio dela é possível determinar a eficiência das estações de tratamento de águas residuárias para que os corpos d'água receptores apresentem, ao longo de toda sua extensão, concentrações de OD compatíveis com as exigências da legislação ambiental (*e.g.*, Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005).

De acordo com Queiroz *et al.* (2015), desde o início do século XX diversos pesquisadores realizaram esforços com o objetivo de entender o fenômeno da reaeração superficial. Como resultado, foram desenvolvidas diversas técnicas para estimar o  $K_2$ . De acordo com Cox (2003), as principais técnicas são: Balanço do oxigênio dissolvido (STREETER; PHELPS, 1925) e traçadores gasosos (TSIVOGLOU; WALLACE, 1972). No entanto, algumas das técnicas fornecem diferentes estimativas do  $K_2$ , e outras são onerosas e dispendiosas (BICUDO; JAMES, 1989).

Com base em considerações teóricas e investigações experimentais, estudiosos do assunto (*e.g.*, GIORGETTI; GIANANTI, 1983; BICUDO; JAMES, 1989; GIORGETTI; SCHULZ, 1990; BELANGER *et al.*, 1999) têm apresentado contribuições para melhorar a estimativa de  $K_2$ . Uma das técnicas de previsão compreende o uso de uma sonda solúvel flutuante.

Desenvolvida inicialmente por Giorgetti e Giansanti (1983) a técnica da sonda solúvel flutuante constitui um método alternativo e bastante promissor, principalmente por sua simplicidade e baixo custo (BICUDO; JAMES, 1989; BELANGER *et al.*, 1999). Os autores da técnica partiram da hipótese que a velocidade de dissolução ( $V_s$ ) de um sólido submerso e flutuando próximo à interface ar-água é influenciada pela turbulência do escoamento da água. Esta turbulência, por sua vez, é também um fator que influencia a reaeração superficial do corpo d'água.

O propósito do presente trabalho consistiu em calibrar (obter uma relação entre  $K_2$  e  $V_s$ ) uma nova configuração para sonda solúvel flutuante, em formato esférico e constituída de ácido oxálico dihidratado. Esta calibração ocorreu em diferentes épocas do ano e em cursos d'água naturais, com o intuito de abranger um gradiente de características químicas, físicas e hidráulicas distintas. Por fim, a calibração entre as técnicas de estimativa e a proposição de eventuais aprimoramentos metodológicos podem contribuir para maior confiabilidade nas estimativas do  $K_2$ .

## MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa foi realizada em quatro riachos localizados no município de São Carlos (SP) (Tabela 1). A Tabela 2 apresenta as metodologias utilizadas na caracterização dos principais parâmetros físicos, químicos e hidráulicos dos riachos.

**Tabela 1: Localização dos riachos e principais características utilizadas na escolha dos riachos.**

Riacho/Trecho/Código	Coordenadas geográficas	Extensão do trecho (m)	Características do riacho
Espraiado/Trecho 1/ESP1	21°58'46,75"S 47°52'23,11"O	127	Meandros e velocidades moderadas
Espraiado/Trecho 2/ESP2	21°58'55,7"S 47°52'26,9"O	240	Canal retangular de alvenaria
Canchin/Trecho 3/CAN	21°58'47,78"S 47°50'33,73"O	106	Alta velocidade e profundidade rasa
Santa Maria/Trecho 4/SMA	22°02'41,34"S 47°58'03,95"O	140	Alta velocidade e pequenas quedas d'água

**Tabela 2: Metodologias utilizadas para a caracterização química, física e hidráulica dos riachos.**

Caracterização	Variável	Unidade	Método	Equipamento/Referência
Química	pH	-	Potenciometria	Sonda multiparâmetros Hanna-9828
	Condutividade elétrica (CE)	µS/cm	Potenciometria	Sonda multiparâmetros Hanna-98192
Física	Temperatura (T)	°C	Potenciometria	Escala métrica
	Profundidade (H)	m	Medição direta	
	Largura (B)			
Hidráulica	Velocidade (U)	m/s	Traçador químico	De acordo com Webster e Vallet (1996)
	Vazão (Q)	L/s		
	Reynolds (Rey)	-	Equação	De acordo com Porto (2006)

Na aplicação da técnica do traçador gasoso, foram utilizados o cloreto de sódio (NaCl), como traçador conservativo, e o gás hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>) como traçador não conservativo e inerte. Estes tipos de traçadores geraram resultados consistentes em pesquisas prévias desenvolvidas por Benson *et al.* (2014) e Demars *et al.* (2015).

Antes de realizar a aplicação da técnica do traçador gasoso no riacho, uma solução de traçadores, contendo NaCl, água destilada e SF<sub>6</sub> dissolvido, foi preparada e inserida em um garrafão específico. A concentração da solução de traçadores foi de 238 g/L de NaCl e 60 mL/L de SF<sub>6</sub>. Esta solução foi preparada 12 horas antes das coletas, para garantir uma dissolução uniforme do gás na solução de NaCl.

Em campo, foram escolhidas as extensões dos trechos (Tabela 1), e definidos os locais para a liberação da solução de traçadores (a montante do trecho), e uma seção de controle (a jusante do trecho) onde foi monitorada e registrada a condutividade elétrica.

Para a aplicação da técnica do traçador gasoso foi utilizado o método do patamar ou *plateau* (BARBOSA JÚNIOR, 1997). A solução de traçadores foi liberada com uma vazão constante por uma bomba dosadora peristáltica (FMI Lab-pump/QBG). A vazão da bomba foi estimada pelo método volumétrico em triplicata. Para cada trecho, a CE da água foi acompanhada na estação de controle até o momento que atingisse um *plateau*, e posteriormente 10 amostras de água do trecho foram coletadas por meio de frascos com septos de silicone. Os frascos foram submersos próximos à superfície e lacrados sob a água. Por fim, certificou-se visualmente a ausência de bolhas de oxigênio no interior de cada frasco.

A análise do SF<sub>6</sub> dissolvido nas amostras de água foi realizada por meio da técnica do *headspace* (THENE; GULLIVER, 1990; RILEY; DODDS, 2013) com o uso de nitrogênio ultra puro e seringas de polietileno, em

uma proporção de gás e líquido igual a 1:1(v). A leitura (quantificação) do SF<sub>6</sub> foi realizada em um cromatógrafo gasoso (Shimadzu GC-2014 “Greenhouse” com autoamostrador AOC-5000).

O fenômeno de dessorção do gás traçador ( $K_{SF_6}$ ) corresponde a uma cinética 1ª ordem, e assemelha-se à reaeração superficial com base em um fator de conversão. Canale *et al.* (1955) relatam que o fator de conversão (*i.e.*, dessorção para reaeração) é a razão entre o  $K_2$  e o  $K_{SF_6}$ , sendo igual a 1,38. Assim, o coeficiente de dessorção do SF<sub>6</sub> corresponde a um coeficiente angular da reta multiplicado pela velocidade do escoamento. Este coeficiente foi obtido por meio de um ajuste linear entre o logaritmo do sinal cromatográfico e a distância acumulada das estações de amostragem no trecho. Para obter o  $K_2$  do trecho foi utilizada a relação supramencionada proposta por Canale *et al.* (1955).

O composto químico sólido e solúvel utilizado na confecção da sonda esférica solúvel flutuante foi o ácido oxálico dihidratado (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub> - 126,07 g/mol), devido à sua baixa toxicidade e alta solubilidade (COSTA, 1999). O formato esférico foi obtido por meio da compactação por pressão em uma prensa hidráulica industrial, onde foi aplicado uma força peso de 100 kN sobre um molde metálico esférico acoplado.

As sondas esféricas solúveis flutuantes (SESF) (Figura 1) produzidas possuíam 31 mm de diâmetro, e foram perfuradas até uma profundidade de 15 mm por uma microperfuradeira. O furo foi preenchido por resina epóxi e uma haste metálica de 2 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento. A ponta livre da haste metálica foi acoplada em um suporte flutuador de poliestireno revestido com fita adesiva de polietileno.

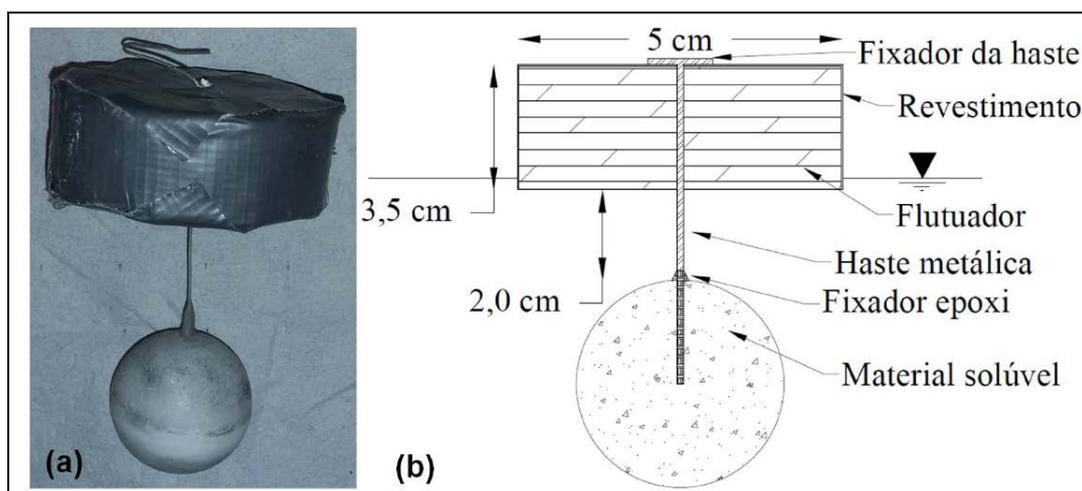


Figura 1: Sonda esférica solúvel flutuante: (a) SESF confeccionada; (b) esquema em corte longitudinal da SESF sob a água.

A aplicação do método da SESF ocorreu nos trechos após a técnica do traçador gasoso. A SESF foi submersa a 2,5 cm da superfície livre, e posta a flutuar no sentido do escoamento do riacho (estação a montante do trecho). O tempo de percurso foi cronometrado, e o diâmetro da SESF foi medido com auxílio de um paquímetro na estação de controle. Por meio de um ajuste linear, entre os diâmetros medidos e o tempo acumulado de percurso da SESF no trecho, foi obtido o coeficiente angular da reta correspondente à velocidade de dissolução ( $V_s$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados da caracterização físico-química e hidráulica dos riachos estão apresentados na Tabela 3. A profundidade média entre os riachos variou de 10 cm (Riacho CAN) a 40 cm (Riacho ESP1), e a largura média da seção, de 43 cm (Riacho ESP2) a 327 cm (Riacho SMA). Devido à diferença temporal das coletas, os distintos valores das variáveis que caracterizam a turbulência do fluxo dos corpos d'água (*i.e.*,  $U$ ,  $Q$  e  $Rey$ ) possibilitaram a obtenção de uma boa correlação nos ajustes lineares de  $V_s$  ( $R^2 > 0,98$ ) e do  $K_{SF_6}$  ( $0,78 < R^2 < 0,95$ ).

**Tabela 3: Resultados da caracterização físico-química e hidráulica dos riachos.**

Data	Coletas	Riacho	pH (-)	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	H (m)	B (m)	U (m/s)	Q (L/s)	Rey (-)
Agosto/2016	1	ESP1	5,5	13,4	16,8	0,32	0,68	0,04	14,8	16.746
	2	ESP2	6,3	13,1	16,6	0,12	0,43	0,19	13,7	35.207
	3	CAN	6,2	24,5	19,0	0,11	1,10	0,05	5,2	9.503
	4	SMA	6,5	31,6	19,0	0,19	3,27	0,15	78,9	53.877
Outubro/2016	5	ESP1	4,8	16,1	20,2	0,40	0,95	0,06	21,0	29.772
	6	ESP2	5,5	17,9	20,3	0,16	0,43	0,26	26,9	59.203
	7	CAN	5,8	26,8	19,6	0,10	0,93	0,05	5,3	9.839
	8	SMA	6,8	31,2	23,7	0,18	3,14	0,21	76,9	72.925

Os valores de  $K_2$ ,  $K_{\text{SF}_6}$  e  $V_s$  estão apresentados na Tabela 4.  $K_2$  variou de  $15,5 \text{ dia}^{-1}$  (coleta 1) para menores turbulências (*i.e.*,  $U = 0,04 \text{ m/s}$ ) a  $548,2 \text{ dia}^{-1}$  (coleta 8) para elevadas turbulências (*i.e.*,  $U = 0,21 \text{ m/s}$ ). Estes resultados confirmam a análise descrita por Chapra (1997) e Queiroz *et al.* (2015), que corpos d'água rasos e velozes possuem elevado  $K_2$  devido a maiores turbulências que ocorrem na interface ar-água, o que justifica os elevados valores de  $K_2$  obtidos nos riachos CAN e SMA.

**Tabela 4: Coeficientes de dissipação do SF<sub>6</sub>, reaeração superficial e velocidade de dissolução obtidos.**

Coletas	$K_{\text{SF}_6} (\text{dia}^{-1})$	$K_2 (\text{dia}^{-1})$	$V_s (\text{m}/\text{dia})$
1	11,2	15,5	1,68
2	26,2	36,2	1,90
3	14,5	20,0	4,23
4	259,6	358,2	7,68
5	20,2	27,8	2,11
6	84,7	116,9	2,33
7	110,4	152,3	3,54
8	397,3	548,2	11,14

Benson *et al.* (2014), por meio da técnica do traçador gasoso, empregaram o SF<sub>6</sub>, xenônio e a rodamina-WT para estimar o  $K_2$  de dois rios na Califórnia/EUA. Os autores utilizaram o método da longa injeção dos traçadores por meio de um sistema de dissolução do gás por borbulhamento direto no curso d'água do rio. Os resultados obtidos demonstraram que a presença de pequenas cachoeiras e quedas d'água contribuíram para elevados valores de reaeração superficial ( $K_2 > 47 \text{ dia}^{-1}$ ), assim como o  $K_2$  dos riachos CAN e SMA obtidos neste estudo.

Jin *et al.* (2012), por meio da técnica do traçador gasoso, utilizaram o propano e o NaCl para estimar a reaeração superficial de quatro pequenos riachos localizados em Tennessee/EUA. Os resultados de  $K_2$  obtidos foram  $5,4$  a  $40 \text{ dia}^{-1}$ , e apresentaram  $R^2$  variando de  $0,47$  a  $0,98$ . Estes valores de  $K_2$  assemelham-se aos obtidos nos riachos ESP1 e ESP2, nos quais os  $K_2$  foram menores ( $15,5 < K_2 < 36,2 \text{ dia}^{-1}$ ), pois os riachos ESP 1 e 2 não possuem uma elevada turbulência.

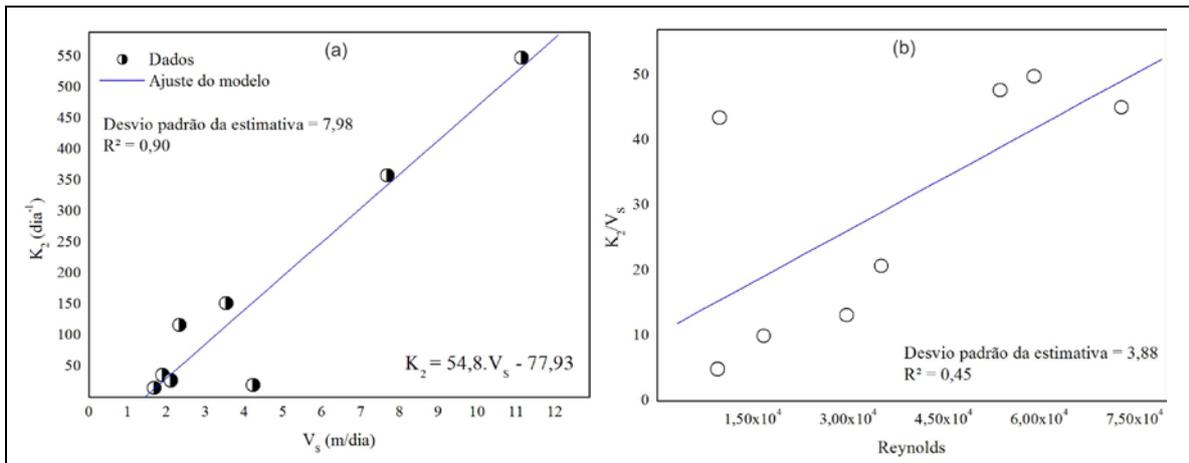
Bicudo e James (1989) e Belanger *et al.* (1999) aplicaram a técnica da sonda solúvel flutuante em escoamentos de água sob condições laboratoriais. Bicudo e James (1989) obtiveram valores de  $V_s$  variando de  $0,00126 \text{ m}/\text{dia}$  a  $0,003 \text{ m}/\text{dia}$  e o  $K_2$  variou de  $5,67 \text{ dia}^{-1}$  a  $33,26 \text{ dia}^{-1}$ . Belanger *et al.* (1999) obtiveram valores de  $V_s$  de  $4,57 \text{ m}/\text{dia}$  a  $18,31 \text{ m}/\text{dia}$  e o  $K_2$  variou de  $0,72 \text{ dia}^{-1}$  a  $11,76 \text{ dia}^{-1}$ . Os valores de  $K_2$  e  $V_s$  obtidos em ambas as pesquisas são semelhantes aos obtidos neste estudo, confirmando que o método da sonda solúvel flutuante possui elevado potencial para ser aplicada em cursos d'água naturais.

Conforme descrito por Giorgetti e Schulz (1990), os fenômenos de dissolução da SESF e a reaeração superficial não possuem uma relação de causa-efeito. Ambos os processos de transferência de massa estão relacionados, pois dependem do nível de turbulência do corpo d'água. Portanto, uma relação deve existir, o que torna possível o uso do  $V_s$  para a determinação indireta do  $K_2$ . A Figura 2 ilustra a relação  $K_2$  e  $V_s$  obtida nesta pesquisa.

Na Figura 2(a), a análise de regressão linear indica que 90% da variabilidade de  $K_2$  são explicadas pelo modelo representado pela Equação 1, obtida de fluxos em corpos d'água naturais. Resultados semelhantes foram encontrados por Bicudo e James (1989),  $R^2$  igual a 0,95; e Belanger *et al.* (1999),  $R^2$  igual a 0,93, com o uso de sondas planas de ácido benzoico.

$$K_2 = 54,8.V_s - 77,93 \quad \text{Equação (1)}$$

Em que,  $K_2$  é o coeficiente de reaeração superficial ( $\text{dia}^{-1}$ ), e  $V_s$  a velocidade de dissolução da SESF (m/dia).



**Figura 2: (a) Relação empírica entre  $K_2$  e  $V_s$  nas mesmas condições de turbulência e temperatura da água; (b) Relação entre a razão  $K_2/V_s$  em função do número de Reynolds.**

De acordo com a Figura 3(b), a razão entre  $K_2$  e  $V_s$  não apresentou uma reta constante e independente da turbulência. Nota-se que a razão  $K_2/V_s$  aumenta com a turbulência do fluxo, e  $K_2$  foi mais sensível a elevação desta turbulência do que  $V_s$ . Para que o método da SESF seja validado, Bicudo e James (1989) afirmaram que razão  $K_2/V_s$  deveria ser constante, igual à razão existente entre o coeficiente de desorção de um gás traçador (*e.g.*, SF<sub>6</sub>, Propano, Etileno) e o  $K_2$ .

## CONCLUSÕES

A correlação entre  $K_2$  e  $V_s$  forneceu um bom ajuste linear. Entretanto, nenhuma base teórica e experimental indica que a relação entre a razão de  $K_2$  e  $V_s$  seja constante e independente do nível de turbulência. Por isso, a aplicabilidade do modelo de correlação obtido foi restrita às condições físicas e hidráulicas nas quais as coletas foram realizadas.

Conclui-se que o método da SESF possui um elevado potencial, devido à simplicidade e baixo custo. Entretanto, para que se possa atribuir utilidade definitiva a este método, é necessária a calibração em cursos d'água naturais de portes maiores para a determinação das incertezas associadas à correlação entre  $K_2$  e  $V_s$ .

## AGRADECIMENTOS

Os autores reconhecem e agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processo nº 2016/14176-1, ao trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARBOSA JÚNIOR, A.R. *Uso de traçadores na determinação de parâmetros de qualidade em escoamento naturais da água*. 456 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

2. BELANGER, T.V.; MEYER, J.A.; von CANAL, M.G.; DESIK, M.V. A simple Field technique for accurate reaeration estimates in aquatic systems. *Lake and Reservoir Management*, v.15, n.3 p.185-199, 1999.
3. BENSON, A.; ZANE, M.; BECKER, T.E.; VISSER, A.; URIOSTEGUI, S.H.; DERUBEIS, E.; MORAN, E.J.; ESSER, B.K.; CLARK, J.F. Quantifying reaeration rates in alpine streams using deliberate gas tracer experiments. *Water - Open Access Journal*, v.6, n.4, p.1013-1027, 2014.
4. BICUDO, J.R.; JAMES, A. Measurement of reaeration in streams: Comparison of techniques. *Journal of Environmental Engineering*, v.11, n.2, p.992-1010, 1989.
5. CANALE, R.P.; OWENS, E. M.; AUER, M.T.; EFLER, S.W. Validation of water-quality model for Seneca River, N.Y. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.121, n.3, p.241-250, 1995.
6. CHAPRA, S.C. *Surface water-quality modeling*. McGraw-Hill. 844p. 1997.
7. COSTA, O.S. *Contribuição à metodologia para determinação indireta do coeficiente de reaeração dos escoamentos naturais de água com emprego do método da sonda solúvel*. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
8. COX, B. A review of dissolved oxygen modeling techniques for lowland Rivers. *The Science of the Total Environment*, v.314-316, p.303-334, 2003.
9. DEMARS, B.O.L.; THOMPSON, J.; MANSON, J.R. Stream metabolism and open diel oxygen method: Principle, practice, and perspectives. *Limnology and Oceanography: Methods*, v.13, n.7, p.356-374, 2015.
10. GIORGETTI, M.F.; GIANSAANTI, A.E. Avaliação do nível de turbulência em águas correntes e sua correlação com o coeficiente de reaeração superficial. In: *XII Congresso da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, anais... Camboriú: p.133-138, 1983.
11. GIORGETTI, M.F.; SCHULZ, H.E. Sobre o método da sonda solúvel flutuante para a determinação indireta do coeficiente de reoxigenação superficial em corpos d'água. In: *III Encontro Nacional de Ciências Térmicas*, Anais... Itapema: p.1079-1084, 1990.
12. JAZEN, G.; SCHULZ, H.E.; LAMON, A.W. Medidas da Concentração de Oxigênio Dissolvido na superfície da água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.13, n.3, 2008.
13. PORTO, R.M.de. *Hidráulica Básica*. 4 ed. Editora da USP, 2006.
14. QUEIROZ, F.M.; MATOS, A.T.; von SPERLING, M. Estimativa do coeficiente de rearação da água em canal raso de fundo deslizante. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.20, n.1, p.79-78, 2015.
15. RILEY, A.J.; DODDS, W.K. Whole-stream metabolism: strategies for measuring and modeling diel trends dissolved oxygen. *Freshwater Science*, v.32, n.1, p.56-69, 2013.
16. SARDINHA, D.S.; CONCEIÇÃO, F.T.; SILVEIRA, A.; DE JULIO, M.; GONÇALVES, J.C.S.I. Avaliação da qualidade da água e autodepuração do ribeirão do meio, Leme (SP). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.13, n.3, p.329-338, 2008.
17. STREETER, H.W.; PHELPS, E.B. A study of the pollution and natural purification of the Ohio River. *U.S. Public Health Service*, n. 146, 75 p. 1925.
18. THENE, J.R.; GULLIVER, J.S. Gas-transfer measurements using headspace analysis of propane. *Journal of Environmental Engineering*, v.116, n.6, p.1107-1124, 1990.
19. TSIVOGLIOU, E.C.; WALLACE, J.R. *Characterizing stream reaeration capacity*. Rep. No, EPA-R3-72-012. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 1972.
20. WEBSTER, R.J.; VALLET, H.M. *Solute dynamics*. In: *Methods in Stream Ecology*. 2 ed. Elsevier, p.169-185, 1996.