

Estimativa do coeficiente de transferência de massa de oxigênio com o uso da técnica das sondas solúveis flutuantes: um estudo de laboratório

Estimating the mass transfer coefficient using the floating soluble probes technique: a laboratory study

Murilo de Souza Ferreira^{1*} , Rafael Velozo de Oliveira² , Luiz Eduardo da Silveira Urzêdo² ,
Guilherme Barbosa Lopes Júnior² , Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves² 

RESUMO

A sonda solúvel flutuante (SSF) é considerada uma técnica de baixo custo para a estimativa do coeficiente de transferência de massa de oxigênio na interface ar-água (K_L). Essa técnica se baseia no fato que K_L pode ser correlacionado com a velocidade de dissolução do sólido solúvel (V_S), uma vez que ambos os parâmetros são influenciados pela turbulência na superfície do escoamento. O objetivo do presente estudo consistiu em calibrar uma nova configuração da SSF. Experimentos de reaeração superficial e dissolução da sonda solúvel foram realizados em dois aparatos experimentais (tanque agitado por jatos e um canal hidráulico circular), de modo que diferentes níveis de turbulência foram produzidos. Os resultados mostraram forte correlação entre K_L e V_S ; $r = 0,953$ para experimentos realizados no tanque e $r = 0,895$ para experimentos realizados no canal. A nova configuração da SSF forneceu razão $K_L \cdot V_S^{-1}$ crescente em função do número de Reynolds, indicando que a relação entre os dois parâmetros é dependente da turbulência. Conclui-se que a técnica SSF possui elevado potencial. Entretanto, para que se possa atribuir utilidade definitiva, verificações em cursos d'água naturais e em equipamentos com estrutura de turbulência diferentes das utilizadas neste estudo ainda são necessárias.

Palavras-chave: K_L ; reaeração superficial; oxigênio dissolvido; sonda solúvel flutuante.

ABSTRACT

The floating solid soluble probe is a low-cost technique for estimating the mass transfer coefficient of oxygen in the air-water interface (K_L). This technique is based on the fact that K_L can be correlated with the dissolution rate of a soluble solid (V_S), since both parameters are influenced by the surface turbulence. The aim of this study was to calibrate a new floating solid soluble probe configuration. Surface reaeration experiments and dissolution of the soluble solid probe were performed in two experimental apparatus (jets stirred tank and a circular hydraulic channel), in which different levels of turbulence were produced. The results showed a strong correlation between K_L and V_S , $r = 0.953$ for experiments performed on the tank and $r = 0.895$ for experiments performed on the channel. The new floating solid soluble probe configuration provided an increasing $K_L \cdot V_S^{-1}$ ratio as a function of the Reynolds number, indicating that the relationship between these two parameters depends on the surface turbulence. We conclude that the floating solid soluble probe technique has a high potential, despite calibrations in natural water bodies and equipment with a turbulence structure different from those used in this study are still necessary to definitive utility.

Keywords: K_L ; surface reaeration; dissolved oxygen; solid soluble probe.

INTRODUÇÃO

A transferência de gases na interface ar-água é um processo físico que ocorre em razão da diferença de concentração, das espécies químicas, entre o ar e o meio líquido. Ela é controlada por uma complexa interação entre difusão molecular e fenômenos turbulentos que ocorrem junto à interface (NGUYEN; TAN, 2013;

QUEIROZ; MATOS; VON SPERLING, 2015; MARADEI *et al.*, 2015; GONÇALVES *et al.*, 2018).

O processo de transferência de gases na interface ar-água é relevante para a área de engenharia sanitária e ambiental, já que constitui uma parte importante dos ciclos biogeoquímicos de substâncias, como nitrogênio, carbono e oxigênio (JANZEN; SCHULZ; LAMON,

¹Universidade de São Paulo - São Carlos (SP), Brasil.

²Universidade Federal do Triângulo Mineiro - Uberaba (MG), Brasil.

*Autor correspondente: muriloferreira@usp.br

Recebido: 08/12/2016 - Aceito: 19/03/2018 - Reg. ABES: 173205

2008; HOLGERSON; ZAPPA; RAYMOND, 2016; STEWARDSON; SKINNER, 2017). Entre essas substâncias, interesse dominante reside na transferência de oxigênio do ar para a água, processo denominado reaeração superficial ou reoxigenação superficial.

Na prática, o interesse nesse assunto está relacionado ao fato de que a reaeração superficial é a principal fonte para o restabelecimento da concentração de oxigênio dissolvido (OD) em corpos d'água. O avanço no conhecimento da absorção de oxigênio pelo corpo d'água resulta em uma melhora na quantificação da velocidade de transferência de massa de oxigênio (coeficiente de transferência de massa de oxigênio na interface ar-água – K_L), a qual é parâmetro essencial dos modelos de qualidade da água (SALLA *et al.*, 2013; OMOLE; LONGE; MUSA, 2013; MATEUS *et al.*, 2015; MENEZES *et al.*, 2015; GONÇALVES *et al.*, 2017).

A avaliação e a previsão da concentração de OD por meio de modelos de qualidade da água são, na maioria dos casos, sensíveis ao K_L e sua estimativa correta define indiretamente a quantidade de resíduos orgânicos que pode ser lançada no corpo d'água sem comprometimento da qualidade da água (KALBURGI *et al.*, 2015).

De acordo com Queiroz, Matos e von Sperling (2015), desde o início do século XX, diversos pesquisadores realizaram esforços com o objetivo de entender o fenômeno da reaeração superficial. O resultado desses estudos foi o desenvolvimento de modelos conceituais, empíricos e semiempíricos capazes de relacionar K_L a parâmetros físicos e hidráulicos do escoamento, tais como velocidade, vazão, profundidade e declividade (MOOG; JIRKA, 1999; GUALTIERI; GUALTIERI; DORIA, 2002; COSTA *et al.*, 2015; MARADEI *et al.*, 2015; GONÇALVES *et al.*, 2017). No entanto, esses modelos produzem pobres estimativas, quando aplicados em condições de escoamentos diferentes das quais eles foram originados; sendo verificados erros de estimativa de 40 a 50% (PALUMBO; BROWN, 2014).

Na tentativa de reduzir as incertezas das estimativas, técnicas para determinação experimental do K_L surgiram, e de acordo com Cox (2003), as principais são: perturbação do equilíbrio, desenvolvida por Gameson, Truesdale e Downing (1955); balanço de OD e traçadores gasosos (TSIVOGLOU; WALLACE, 1972).

A técnica do balanço de oxigênio é baseada em uma versão mais sofisticada do modelo unidimensional originalmente proposto por Streeter e Phelps (1925). Ela está sujeita a erros significativos, resultantes das várias fontes e sumidouros de oxigênio que muitas vezes não podem ser considerados uniformemente distribuídos em um corpo d'água (BENNETT; RATHBUN, 1972). A técnica da perturbação do equilíbrio baseia-se na redução do OD, a montante do trecho em estudo, com uso de sulfito de sódio e de um catalisador, geralmente cloreto de cobalto. A reaeração é quantificada pela recuperação da concentração do OD dentro desse trecho. Essa técnica é limitada a corpos d'água em que não há variação temporal da concentração

de OD e a corpos d'água de pequeno porte, com vazões inferiores a $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (GONÇALVES; DA LUZ, 2014). A técnica dos traçadores gasosos é baseada na relação constante que existe entre a taxa de desorção do gás traçador (*e.g.*, propano, etileno) e a taxa de reaeração em um corpo d'água. A constante obtida pode ser utilizada em qualquer sistema de mistura (natural ou laboratorial) para encontrar K_L a partir do coeficiente de desorção do gás (JIN *et al.*, 2012; KNAPP; OSENBRÜCK; CIRPKA, 2015). As restrições ao uso dessa técnica estão relacionadas à necessidade de equipamentos sofisticados (*e.g.*, moto-bombas, cromatógrafo gasoso, seringas, reguladores), bem como de mão de obra especializada (PINHEIRO; FAHT; SILVA, 2012; GONÇALVES *et al.*, 2018).

A técnica da sonda solúvel flutuante (SSF) constitui um método alternativo de baixo custo. Essa técnica foi inicialmente proposta por Giorgetti e Giansanti (1983). Eles partiram da hipótese de que a velocidade de dissolução de um sólido solúvel (V_s) submerso próximo da superfície livre de um corpo d'água é influenciada pela turbulência do escoamento. Essa turbulência, por sua vez, é também responsável por meio do mecanismo de renovação superficial pela reaeração do corpo d'água (GIORGETTI; SCHULZ, 1990). Como os dois processos de transferência de massa dependem do nível de turbulência, os autores acreditavam que deveria existir uma relação entre os dois processos; manifestando-se quantitativamente por meio dos parâmetros K_L e V_s , e tornando-se possível o uso da V_s para a determinação indireta do K_L (GIORGETTI; SCHULZ, 1990). A descrição do avanço no desenvolvimento da SSF foi apresentada por Gonçalves (2012).

Os precursores dessa técnica investigaram intensivamente, com diferentes substâncias químicas e níveis de turbulência, o comportamento de sondas solúveis planas, cujo processo de dissolução ocorre de forma unidimensional (*e.g.*, BICUDO; JAMES, 1989; BELANGER *et al.*, 1999). A sonda solúvel plana pode ser definida como um sólido de formato cilíndrico, cuja área lateral e da base superior são envolvidas por uma cápsula impermeável. Dessa forma, apenas a área da base inferior, em contato com escoamento, era submetida à dissolução. Apesar da boa correlação ($r > 0,8$) obtida entre a velocidade de dissolução unidimensional do sólido e o processo de reaeração superficial, verificou-se que a forma cilíndrica do sólido apresentava como problema o efeito de borda, produzido pela cápsula utilizada para induzir a dissolução unidimensional.

O propósito do presente artigo foi calibrar (obter a relação entre K_L e V_s) uma nova configuração da SSF: sonda esférica constituída de ácido oxálico dihidratado, em dois sistemas de geração de turbulência (canal hidráulico circular e tanque agitado por jatos). Adicionalmente, para ampliar a faixa de aplicação da SSF em diferentes temperaturas, o coeficiente de correção da temperatura (ϕ) para a dissolução do ácido oxálico dihidratado foi estimado. Dessa forma, a velocidade de dissolução do sólido pode ser corrigida em função da temperatura da água.

MATERIAIS E MÉTODOS

Aparatos experimentais

Os experimentos de reaeração superficial e dissolução da SSF foram realizados em aparatos experimentais que visam simular a turbulência existente nos corpos d'água naturais (ambientes lóticos). Para tanto, um tanque cuja massa líquida é agitada por jatos e um canal hidráulico circular foram construídos.

O canal hidráulico circular (Figura 1) é constituído de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV). No canal, a água foi recirculada com o uso de um sistema moto-bomba de 0,25 cv, em dois pontos de sucção e recalque, distribuídos ao longo do perfil longitudinal do escoamento.

A transferência de quantidade de movimento proporcionada pelos jatos, que tangenciavam o fundo, produziu o escoamento no canal. Essa configuração permitiu que o canal funcionasse em circuito fechado sem interrupção da superfície livre, garantindo que os experimentos fossem realizados por um longo período e que o efeito da reaeração superficial estivesse limitado somente à superfície livre do canal.

A velocidade do escoamento (U) foi medida com o uso de um micromolinetes (Marca: Vernier; modelo: FLO-BTA), de 1% de acurácia e $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ de resolução, deslocado em seis diferentes posições do canal, em uma altura equivalente a 60% da profundidade de água, utilizando o fundo do canal como referência. A velocidade foi computada pela média aritmética dos seis pontos medidos. Para a medida da profundidade (H), utilizou-se um paquímetro (0,02 mm de acurácia).

O tanque agitado por jatos (Figura 2) também foi construído com PRFV e possui base quadrada. A recirculação da água foi realizada com um conjunto moto-bomba de 1,5 cv. A água foi recirculada pelo

fundo do tanque, por meio de 324 mangueiras, com 3 mm de diâmetro interno e 80 cm de comprimento, regularmente espaçadas, por onde a água foi injetada e succionada. A profundidade de água utilizada nos experimentos foi de 30 cm, medida desde o fundo do tanque até a superfície livre. Detalhes do tanque utilizado podem ser encontrados no trabalho desenvolvido por Gonçalves *et al.* (2013).

A variação da temperatura da água foi controlada por trocadores de calor do tipo casco e tubo, instalado após o registro da tubulação de recalque, no tanque agitado por jatos, e tipo serpentina, fixado junto à parede interna do canal hidráulico circular. A vazão do escoamento foi medida com uso de uma placa de orifício calibrada e um medidor de pressão diferencial.

Para o tanque agitado por jatos e o canal hidráulico circular, os números de Reynolds foram obtidos conforme a metodologia apresentada por Tamburrino e Aravena (2002) e Bicudo e James (1989), respectivamente.

O resumo das condições hidráulicas dos aparatos experimentais é apresentado na Tabela 1. O valor de U , para o tanque, é representado pela velocidade do escoamento em cada mangueira do sistema de recalque (velocidade do jato).

Sonda solúvel flutuante

Para a confecção das SSF no formato esférico foi utilizado como composto solúvel o ácido oxálico dihidratado ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - $126,07 \text{ g.mol}^{-1}$). Esse ácido possui baixa toxicidade e elevada solubilidade (COSTA, 1999).

A confecção da sonda no formato esférico (Figura 3) foi realizada por meio da compactação por pressão em uma prensa de moldagem (prensa hidráulica industrial de 100 kN), com o uso de um molde metálico em formato esférico. As SSF produzidas tinham 31 mm de

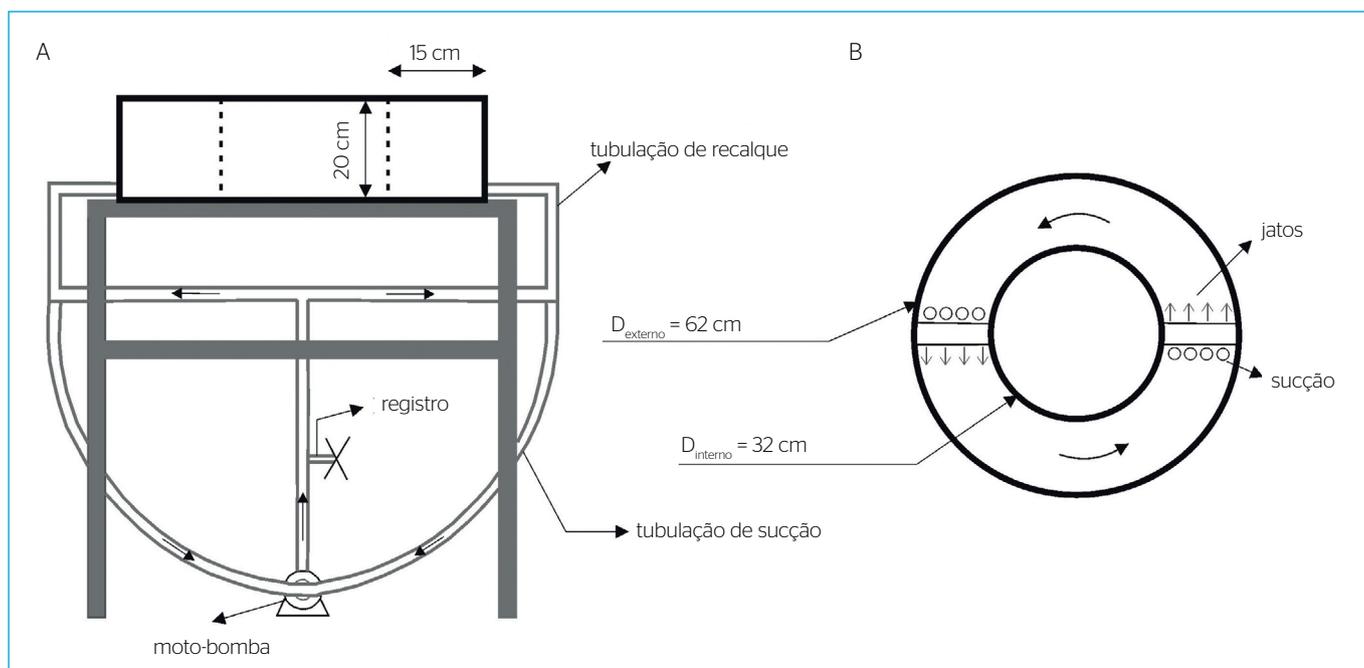


Figura 1 - Esquema do canal hidráulico circular: (A) corte transversal e (B) vista superior.

Tabela 1 - Condições hidráulicas estabelecidas no canal hidráulico circular e no tanque agitado por jatos.

Experimento	U (cm.s ⁻¹)	H (cm)	Rey (-)
Tanque agitado por jatos			
1	1,4	30	4.515
2	1,8	30	5.454
3	2,1	30	6.208
4	2,3	30	6.853
5	2,6	30	7.423
Canal hidráulico circular			
6	22,1	09	8.711
7	37,2	09	14.644
8	48,6	09	19.155
9	58,3	09	22.973
10	20,9	12	9.244
11	36,0	12	15.911
12	48,7	12	21.496
13	59,1	12	26.105
14	21,0	15	10.029
15	35,7	15	17.052
16	56,0	15	26.721
17	65,5	15	31.255

U: velocidade do escoamento; H: profundidade; Rey: número de Reynolds (tanque agitado por jatos) = $\rho \cdot U \cdot H \cdot \mu^{-1}$; Rey (canal hidráulico circular) = $\rho \cdot U \cdot Rh \cdot \mu^{-1}$; em que ρ é massa específica da água (considerada 1.000 kg.m⁻³); μ é a viscosidade dinâmica da água (considerada 1.000 mPa.s); e Rh é o raio hidráulico.

diâmetro e foram perfuradas até uma profundidade de 15 mm por uma furadeira. O furo foi preenchido por resina epóxi e uma haste metálica de 2 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento. Durante os ensaios de dissolução a haste era acoplada em um suporte flutuador de poliestireno revestido com fita adesiva de polietileno.

A SSF foi submergida a 2,5 cm da superfície livre, e posta a flutuar. O diâmetro da SSF foi medido por meio de um paquímetro em

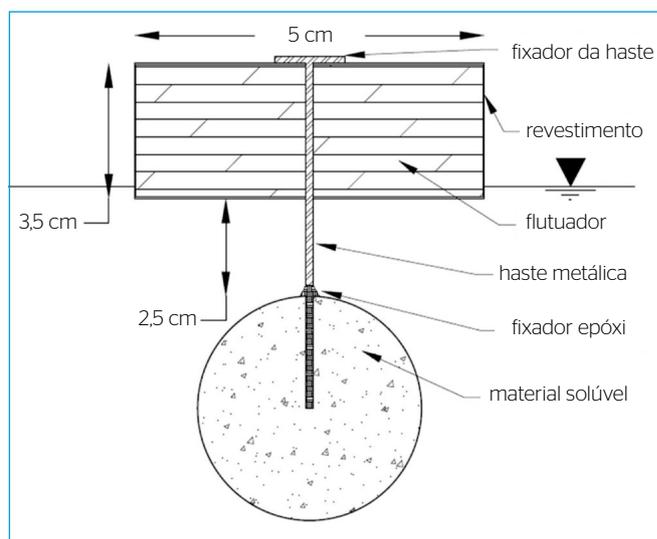
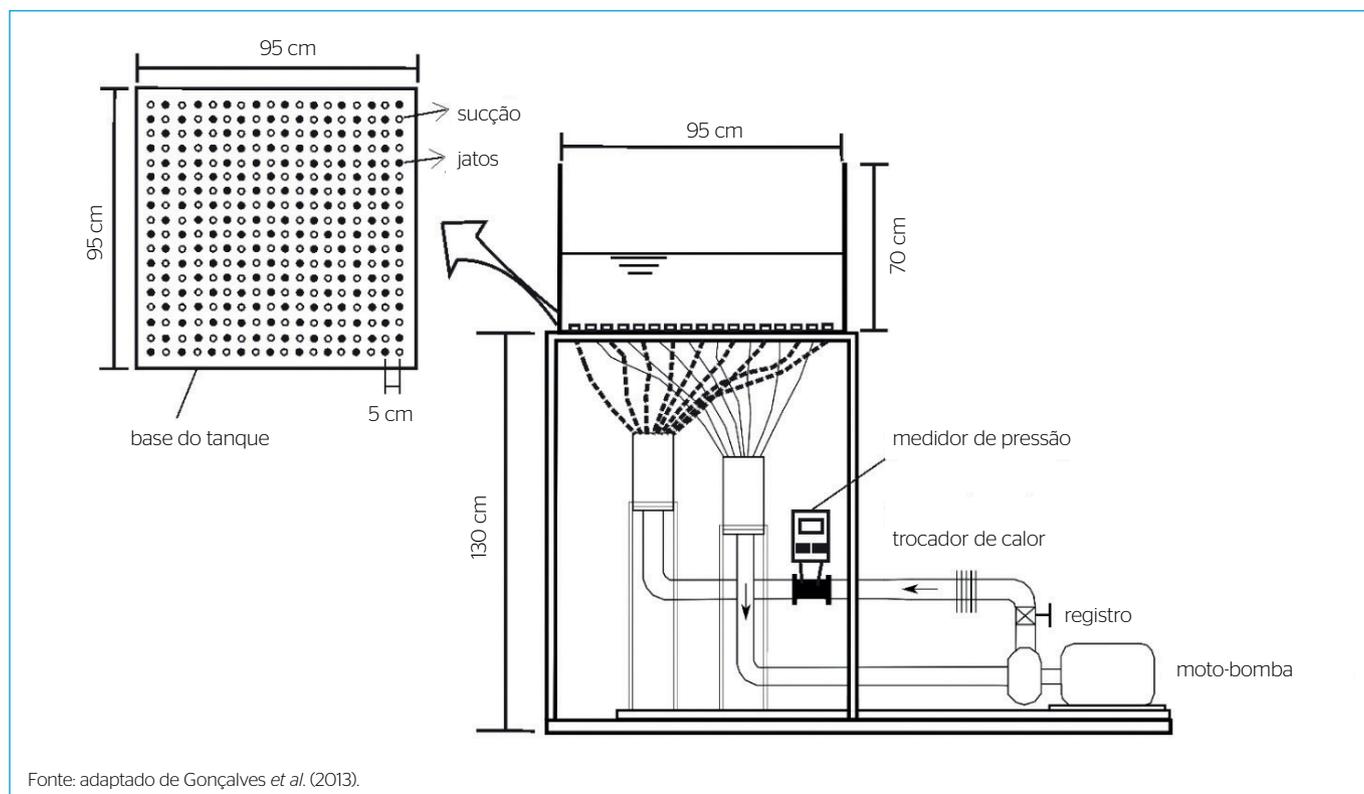


Figura 3 - Esquema de um corte transversal da sonda solúvel flutuante.



Fonte: adaptado de Gonçalves et al. (2013).

Figura 2 - Esquema do tanque agitado por jatos.

tempos estratégicos. Dessa forma, a velocidade de dissolução pôde ser determinada.

A descrição matemática da dissolução da sonda solúvel esférica foi realizada com o uso da Equação 1. Esse modelo foi desenvolvido considerando as seguintes hipóteses:

- Nenhum composto, presente na água, reagia com o material sólido da sonda;
- A turbulência era homogênea; dessa forma, a agitação era a mesma em todos os pontos da superfície do sólido;
- A alteração da concentração do sólido dissolvido na água foi negligenciada.

O valor de V_s foi obtido pela aplicação do método integral.

$$D = D_0 - V_s t \quad (1)$$

Em que:

D = diâmetro da esfera (cm);

D_0 = diâmetro inicial da esfera (cm);

V_s = velocidade de dissolução de um sólido solúvel ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$);

t = tempo (s).

No tanque agitado por jatos, a SSF permanecia em uma posição fixa, no centro do tanque; enquanto, para o canal hidráulico circular, a sonda flutuava e acompanhava o sentido do escoamento.

Ensaio de reaeração superficial

A Equação 2 representa a evolução da concentração de OD em um escoamento em razão da transferência de oxigênio através da interface ar-água, se uma condição de desequilíbrio entre essa interface existir. Ela é resultado do balanço de massa de OD na ausência de sumidouros e considerando-se como fonte apenas o fenômeno da reaeração superficial (GUALTIERI; GUALTIERI; DORIA, 2002).

$$C_{(t)} = C_s - (C_s - C_0) \cdot e^{-\frac{(K_L \cdot A)}{V} t} \quad (2)$$

Em que:

$C_{(t)}$ = concentração de OD em determinado tempo ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);

C_s = concentração de saturação ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);

C_0 = concentração inicial de OD ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);

K_L = coeficiente de transferência de massa de oxigênio na interface ar-água ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

A = área superficial do volume de água em contato com o ar (m^2);

V = volume de água (m^3).

O C_s foi determinado em função da temperatura da água (T) e da altitude (Alt.), conforme equação de Pöpel (1979) (Equação 3).

A pressão atmosférica foi obtida por meio de um barômetro (acurácia de 1%). A relação entre pressão atmosférica e altitude foi obtida por meio da equação apresentada por Bottecchia (2009).

$$C_s = (14,652 - 4,1022 \cdot 10^{-1} \cdot T + 7,9910 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 7,7774 \cdot 10^{-5} \cdot T^3) \cdot \left(1 - \frac{\text{Alt.}}{9450}\right) \quad (3)$$

Em que:

T = temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$);

Alt. = altitude do local (m).

Para a realização dos experimentos de reaeração superficial, os seguintes procedimentos foram adotados:

- O aparato experimental foi abastecido com água da torneira até que a profundidade d'água atingisse a lâmina desejada;
- Após ajustar o registro de modo a obter a velocidade do escoamento desejada, o trocador de calor foi acionado;
- Os sensores de OD e temperatura foram instalados;
- O OD foi removido da água (desoxigenação), conforme a metodologia apresentada por Maradei *et al.* (2015) e Adachi (2015);
- Iniciava-se a reaeração superficial e a coleta de dados de concentração de OD.

A concentração de OD e a temperatura da água foram medidas com oxímetro digital (acurácia de $0,1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, produzido por Hach, modelo LDO 10101) e um termopar (acurácia de $0,2^{\circ}\text{C}$, produzido por Vernier, modelo TMP-BTA), respectivamente.

Os experimentos de reaeração superficial produziram curvas de concentração de OD em função do tempo. O ajuste do modelo (Equação 2) aos dados experimentais e, conseqüentemente, a estimativa de K_L foram realizados com uso da técnica da análise de regressão não linear, sugerido por Asce (1993).

Os valores de K_L foram corrigidos para a temperatura de 20°C por meio da equação de Arrhenius modificada por Streeter e Phelps (1925) (Equação 4).

$$K_L(20) = \frac{K_L(T)}{\theta^{(T-20)}} \quad (4)$$

Em que:

$K_L(20)$ = coeficiente K_L a 20°C ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$);

$K_L(T)$ = coeficiente K_L obtido em uma determinada temperatura ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$);

θ = coeficiente de correção da temperatura, cujo valor adotado foi de 1,0241, conforme sugerido por Elmore e West (1961).

Efeito da temperatura sobre a dissolução do ácido oxálico

Para avaliar o efeito da temperatura sobre a velocidade de dissolução da sonda solúvel esférica flutuante de ácido oxálico dihidratado, um

reator cilíndrico de policloreto de vinila (PVC), com base de 9,8 cm de diâmetro, foi construído (Figura 4). Essa configuração resultou em um volume aproximado de 2,5 L.

A água foi injetada no fundo do reator por meio de um sistema moto-bomba e um bocal de 3 mm de diâmetro. Dessa forma, a turbulência gerada no fundo foi dissipada até a superfície. A regulagem do registro produziu vazões de 82, 92 e 98 L.h⁻¹. O cálculo da vazão foi realizado com uso do método volumétrico em triplicata.

O tempo de detenção hidráulico máximo no reator foi de 1,8 minuto, garantindo que a concentração de ácido oxálico dihidratado no reator fosse próxima à zero; hipótese utilizada na construção do modelo de dissolução (Equação 1). O efeito da temperatura sobre V_s foi avaliado utilizando as três vazões: 82, 92 e 98 L.h⁻¹.

A temperatura da água foi controlada em um pequeno reservatório por um processo em batelada. A máxima variação de temperatura foi de 0,3°C. Para os experimentos com temperaturas inferiores a 25°C, o reservatório era abastecido com gelo, e para temperaturas superiores, ele era aquecido com uso de uma chapa metálica aquecedora.

A SSF foi submergida a 2,5 cm da superfície, e seu diâmetro medido com uso de um paquímetro em intervalos de três minutos. Para cada vazão, sete experimentos foram realizados, um para cada temperatura, a

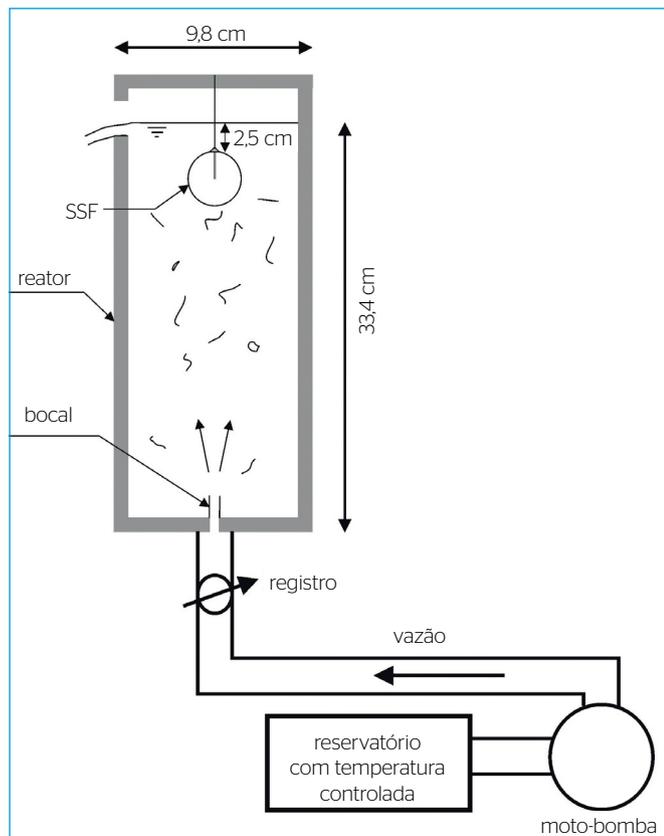


Figura 4 - Esquema do reator utilizado para avaliar o efeito da temperatura sobre sólido solúvel.

qual variou de 5 a 35°C (em intervalo de 5°C). A obtenção da V_s seguiu o modelo de dissolução representado pela Equação 1.

Uma função exponencial (Equação 5) foi utilizada para modelar a velocidade de dissolução em função da temperatura e determinar o ϕ . A obtenção da relação entre V_s e ϕ foi realizada a partir da linearização da função exponencial, através da alteração das variáveis da Equação 5 (SHEN *et al.*, 2014).

$$V_s = V_s(20)\Phi^{(T-20)} \quad (5)$$

Em que:

V_s = velocidade de dissolução do sólido solúvel em determinada temperatura (cm.s⁻¹);

$V_s(20)$ = velocidade de dissolução do sólido solúvel a 20°C (cm.s⁻¹);

T = temperatura da água (°C);

ϕ = coeficiente de correção da temperatura que se deseja obter (-).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Coeficiente de correção da temperatura para a V_s

Os dados de dissolução da sonda esférica de ácido oxálico em função da temperatura e das três vazões são mostrados na Figura 5. Os coeficientes de determinação produzidos pelo ajuste da Equação 1 aos dados obtidos foram satisfatórios ($R^2 > 0,90$).

De acordo com Hixson e Crowell (1931), a variação da temperatura da água altera a solubilidade do sólido solúvel e aumenta a V_s . Nota-se que o processo de dissolução é acelerado com o aumento da temperatura, para as três vazões.

Os valores de V_s obtidos para a temperatura de referência (20°C), para as vazões 82, 92 e 98 L.h⁻¹, foram $2,37 \cdot 10^{-4}$, $2,39 \cdot 10^{-4}$ e $2,41 \cdot 10^{-4}$ cm.s⁻¹, respectivamente (V_s variou no máximo 1,6%). Considerando a V_s média encontrado para cada temperatura (média aritmética dos valores de V_s obtidos, em cada vazão, em uma temperatura constante), a variação máxima ocorreu entre as temperaturas de 5 e 35°C, e foi de 81,7%. Esse resultado mostra que o fenômeno da dissolução da sonda esférica flutuante no reator apresentou menor sensibilidade em relação à variação da vazão do que em relação à variação da temperatura. Isso pode ser explicado em razão da baixa variação das vazões injetadas no fundo do reator, 82 a 98 L.h⁻¹ (variação de 16,3%), e elevada variação das temperaturas testadas, 5 a 35°C (variação de 85,7%).

O coeficiente ϕ obtido pelo ajuste da Equação 5 aos valores de V_s variou de 1,0590 a 1,0617, produzindo um erro relativo máximo de 0,25% (Tabela 2).

Shen *et al.* (2014) obtiveram o ϕ para o processo de dissipação de gases totais dissolvidos (ϕ_d) em diferentes condições de turbulência. Eles encontraram um erro relativo máximo de 0,85%.

Com esse resultado eles concluíram que um valor constante de ϕ_d poderia ser encontrado, independentemente do nível de turbulência. Como neste estudo o erro relativo máximo foi menor do que o encontrado por Shen *et al.* (2014), valor constante de ϕ (1,0605), resultante da média aritmética dos três valores (1,0617; 1,0590; 1,0607), foi utilizado para a correção de V_s em função da temperatura.

Na Figura 6, o ajuste do modelo aos valores de V_s é mostrado. Em 76% dos pontos experimentais, o erro do ajuste do modelo aos dados experimentais foi menor que 10%. A porcentagem aumenta para 90,5% para erros menores que 15%. Esse resultado permite afirmar que

a relação entre a dissolução da sonda esférica de ácido oxálico dihidratado e a temperatura da água pode ser descrita, de forma satisfatória ($R^2 > 0,94$), pela equação presente na Figura 6.

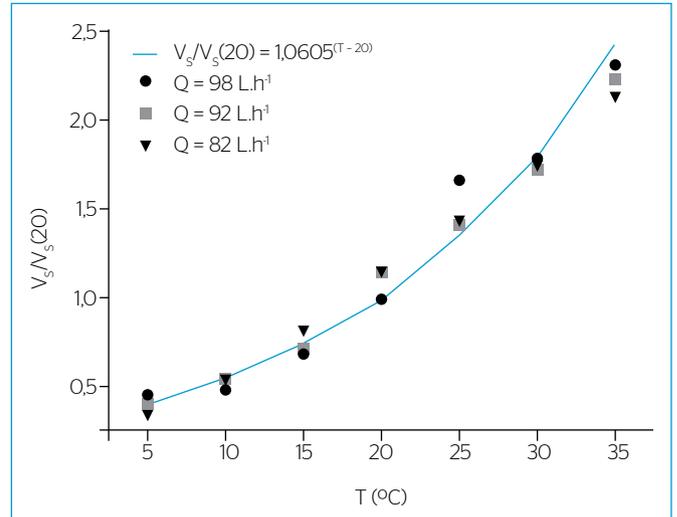


Figura 6 - Relação entre $V_s/V_s(20)$ e a temperatura da água no reator sob três diferentes condições de vazão.

Tabela 2 - Coeficientes de correção da temperatura em diferentes níveis de turbulência.

Vazão (L.h ⁻¹)	V_s 20°C (cm.s ⁻¹)	ϕ	R ²
82	2,3710 ⁻⁴	1,0617	0,968
92	2,3910 ⁻⁴	1,0590	0,988
98	2,4110 ⁻⁴	1,0607	0,968

V_s 20°C: velocidade de dissolução do sólido solúvel a 20°C; ϕ : coeficiente de correção da temperatura; R²: coeficiente de determinação.

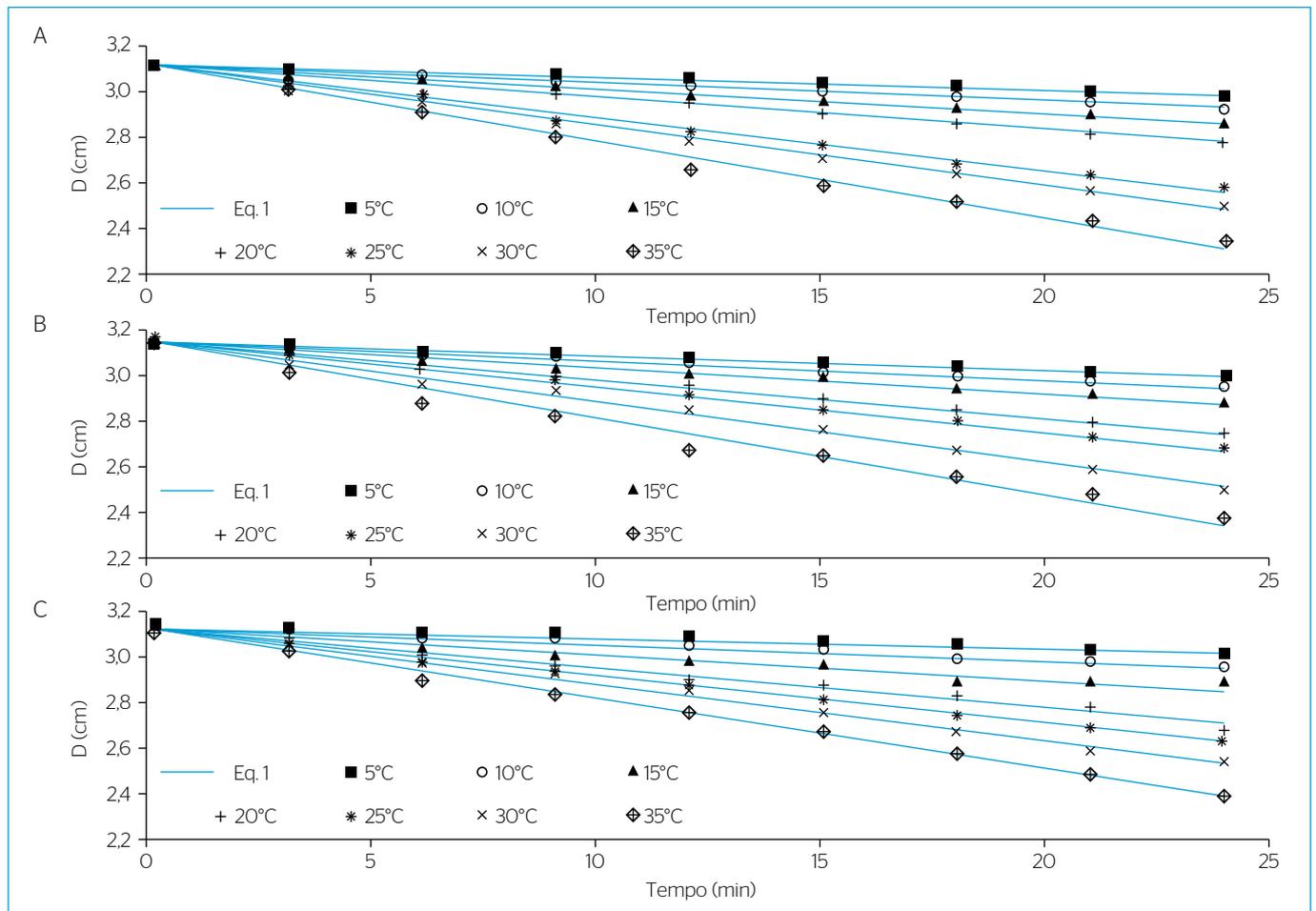


Figura 5 - Dissolução do sólido no reator sob diferentes condições de vazão: (A) 98 L.h⁻¹; (B) 92 L.h⁻¹; (C) 82 de L.h⁻¹.

Tabela 3 - Resultados dos experimentos de reaeração superficial e dissolução da sonda solúvel flutuante.

Experimento	K_L 20°C (cm.s ⁻¹)	V_s 20°C (cm.s ⁻¹)	Temperatura (°C)
Tanque agitado por jatos			
1	0,00076	0,00019	32,5
2	0,00095	0,00023	30,4
3	0,0011	0,00028	29,7
4	0,0012	0,00031	30,1
5	0,0014	0,00030	30,9
Canal hidráulico circular			
6	0,0013	0,00014	25,2
7	0,0029	0,00014	25,4
8	0,0034	0,00020	25,5
9	0,0073	0,00024	26,0
10	0,0016	0,00012	25,3
11	0,0022	0,00013	25,2
12	0,0036	0,00016	24,8
13	0,0050	0,00018	25,2
14	0,0016	0,00011	24,7
15	0,0024	0,00013	25,4
16	0,0035	0,00017	25,4
17	0,0040	0,00019	24,8

K_L 20°C: coeficiente de transferência de massa de oxigênio na interface ar-água a 20°C; V_s 20°C: velocidade de dissolução do sólido solúvel a 20°C.

Relação entre K_L e V_s

Os resultados obtidos de K_L e V_s para os dois sistemas de agitação, são apresentados na Tabela 3. A variação máxima da temperatura da água durante os experimentos de reaeração superficial foi de 1°C para o canal hidráulico circular, e de 5°C para o tanque agitado por jatos. Com relação aos experimentos de dissolução, a variação máxima foi de 0,3°C para o canal hidráulico circular, e de 1°C para o tanque agitado por jatos.

Os coeficientes de determinação obtidos pelo ajuste das Equações 1 e 2 aos dados obtidos foram satisfatórios ($R^2 > 0,90$). Nas Figuras 7 e 8, são mostrados os experimentos de dissolução e reaeração superficial, respectivamente.

Os maiores valores de K_L e V_s (experimento 15) foram obtidos para elevadas turbulências (baixa H e elevada U), e os menores (experimento 1) para baixas turbulências (baixa U). Esses resultados confirmam a análise feita por Queiroz, Matos e von Sperling (2015) de que cursos d'água rasos e rápidos possuem elevado K_L em razão das maiores turbulências na superfície livre.

Conforme reportado por Giorgetti e Schulz (1990), os processos de dissolução da SSF e reaeração superficial não possuem relação de causa-efeito. Eles estão relacionados porque dependem da turbulência do meio líquido. Entretanto, além da turbulência, a temperatura também influencia no estado de dissolução de um sólido solúvel e na

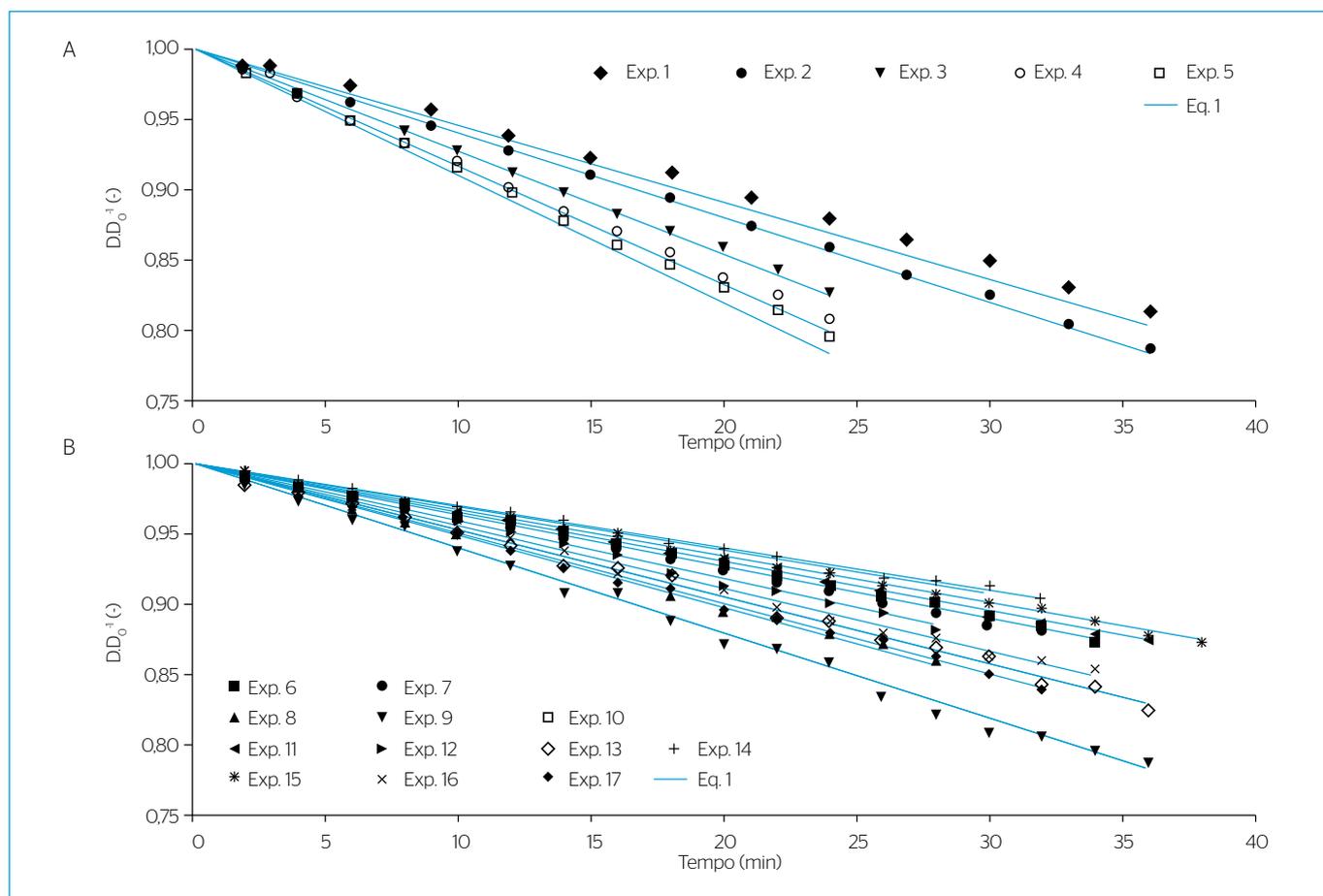


Figura 7 - Experimentos de dissolução da sonda esférica de ácido oxálico adimensionalizados (A) no tanque agitado por jatos e (B) no canal hidráulico circular.

reaeração superficial. Por isso, para a análise de regressão entre os dois processos (Figura 9), V_s e K_L estão representados nas mesmas condições de turbulência e temperatura.

Na Figura 9, a análise de regressão linear indica que 90,9 e 80,1% da variabilidade de K_L são explicadas pelas equações produzidas para o tanque agitado por jatos e o canal hidráulico circular, respectivamente. Resultados semelhantes foram encontrados por Bicudo e James (1989), $R^2 = 0,95$, e Belanger *et al.* (1999), $R^2 = 0,93$, com uso de sondas planas de ácido benzoico.

Apesar de V_s ser um parâmetro confiável para a predição de K_L , observa-se que a relação entre eles não é independente do sistema de agitação. Os dados resultantes dos experimentos no tanque estão traduzidos em relação aos dados do canal hidráulico circular. Além disso, observa-se também que os coeficientes angulares dos modelos empíricos são diferentes para os dois sistemas de agitação. Esse resultado sustenta a hipótese de que a relação empírica entre K_L e V_s poderá ser alterada quando a técnica das SSF for aplicada em escoamentos naturais, em que a escala experimental aumentará significativamente e, conforme descrito por Gulliver (1991), a estrutura de turbulência será

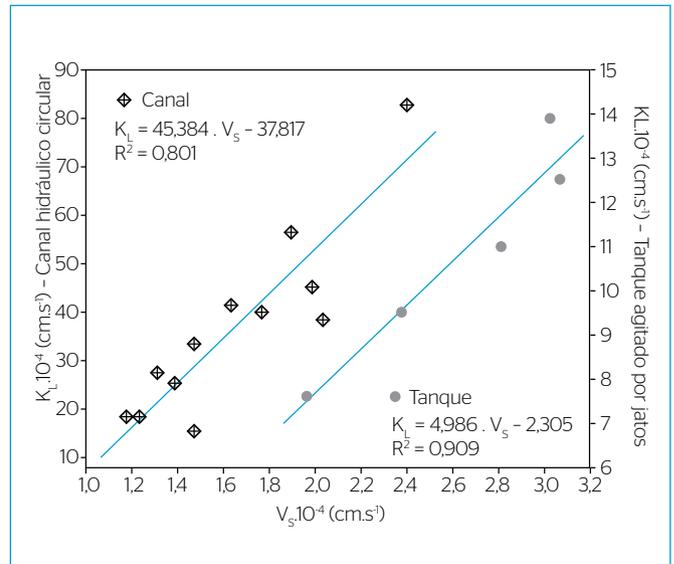


Figura 9 - Relação empírica entre K_L e V_s a 20°C. As restrições para a aplicabilidade dos modelos obtidos são: tanque agitado por jatos ($0,00030 > V_s > 0,00019$) e canal hidráulico circular ($0,00024 > V_s > 0,00011$).

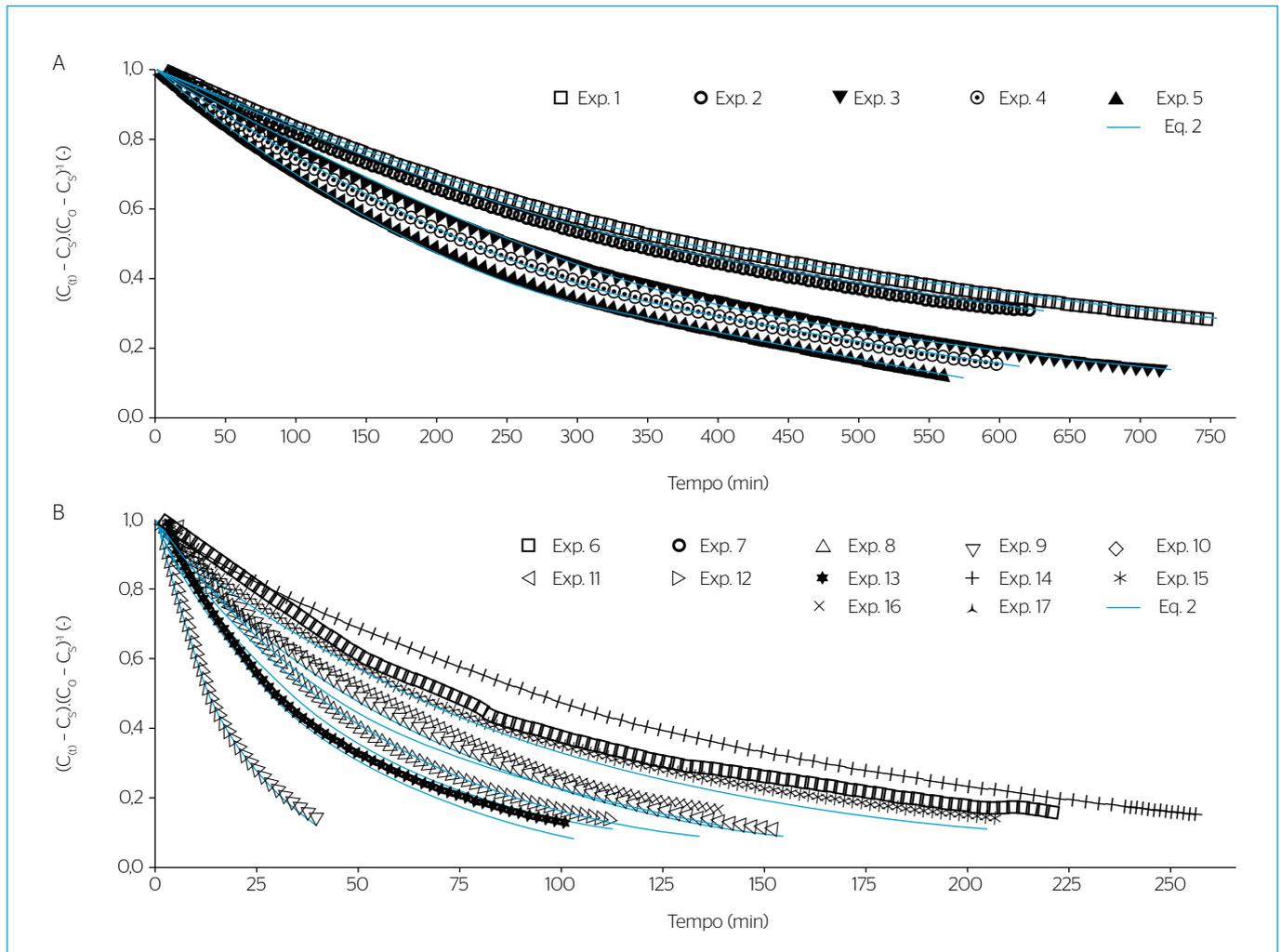


Figura 8 - Experimentos de reeração superficial adimensionalizados (A) no tanque agitado por jatos e (B) no canal hidráulico circular.

influenciada por correntes de fluxo secundário, zonas de estagnação e separação em razão da variação da largura do canal, obstruções, ilhas etc.

Embora o presente trabalho confirme a forte relação entre os parâmetros K_L e V_s , ele também demonstra a importância do entendimento das limitações da técnica da SSF. Diferentemente do que ocorre com a técnica dos traçadores gasosos, uma relação constante e independente da turbulência entre K_L e V_s não foi obtida para a técnica das SSF.

Na Figura 10 é mostrado que a razão entre K_L e V_s é dependente do número de Reynolds. Nota-se que a razão entre K_L e V_s aumenta com a turbulência do escoamento, indicando que o K_L é mais sensível à elevação da turbulência do que a V_s . Bicudo e James (1989) reportaram que esse fato pode estar relacionado à dinâmica da área de contato na interface, que é diferente para os dois processos.

No processo de reaeração superficial, o aumento da turbulência produz um aumento da área da superfície livre em razão da deformação da própria superfície, enquanto no caso da dissolução da sonda o aumento da turbulência não altera a área superficial do sólido. A importância da quantificação da deformação da superfície livre na estimativa da taxa de reaeração superficial é mostrada nos trabalhos de Nguyen *et al.* (2014) e Gonçalves *et al.* (2017).

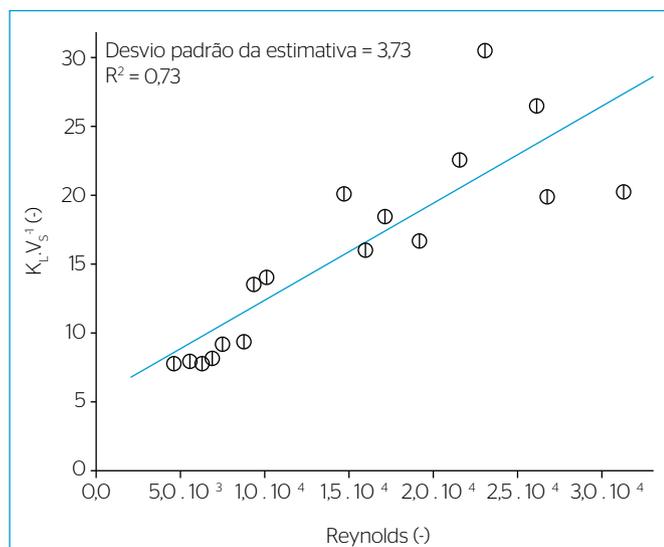


Figura 10 - Relação $K_L V_s^{-1}$ em função do número de Reynolds.

CONCLUSÃO

Este estudo investigou a correlação existente entre o coeficiente de transferência de massa de oxigênio e a velocidade de dissolução de um sólido esférico constituído de ácido oxálico dihidratado. Os experimentos de reaeração superficial e dissolução foram conduzidos em um tanque agitado por jatos e em um canal hidráulico circular. Com os resultados obtidos nos experimentos, pode-se concluir:

- Há forte correlação entre os coeficientes K_L e V_s , tanto para os experimentos realizados no tanque agitados por jatos como nos realizados no canal hidráulico circular. Isso é estatisticamente confirmado pela obtenção de coeficientes de correlação $r = 0,953$ e $r = 0,895$, respectivamente;
- Não foi possível obter um único modelo para determinar K_L a partir de V_s . A relação entre esses dois parâmetros foi alterada em função do tipo de aparato utilizado (tanque e canal);
- A razão entre K_L e V_s aumentou em função do número de Reynolds, indicando que K_L foi mais sensível à turbulência do que V_s ;
- O ϕ para a dissolução do sólido foi obtido ($\phi = 1,0605$). Seu valor é independente da vazão que entra no reator, utilizado para conduzir os experimentos de dissolução em diferentes temperaturas.

Apesar da forte correlação entre os coeficientes K_L e V_s , estudos em escoamentos naturais (escala real) ainda são necessários para avaliar a validade das relações obtidas neste estudo (escala laboratorial). Recomenda-se que as incertezas, associadas à estimativa do K_L por meio de V_s , sejam determinadas, em escala real, a partir da estimativa do coeficiente de transferência de massa de oxigênio pelo método dos traçadores gasosos, que ainda é o método mais acurado para a estimativa de K_L .

Recomenda-se, ainda, que pesquisas futuras estudem a viabilidade do uso de novos compostos químicos solúveis, diferentes tamanhos e formatos geométricos, além de buscarem aprimoramento no processo de confecção das SSF.

FONTE DE FINANCIAMENTO

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

REFERÊNCIAS

ADACHI, T. (2015) Oxygen transfer and power consumption in an aeration system using mist and circulation flow generated by a rotating cone. *Chemical Engineering Science*, v. 126, p. 625-632. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.01.009>

ASCE. (1993) *Standart: Measurement of oxygen in clean water*. Nova York: ASCE/SEI 2-06. 43 p.

BELANGER, T.V.; MEYER, J.A.; VON CANAL, M.G.; DESIK, M.V. (1999) A simple field technique for accurate reaeration estimates in aquatic systems. *Lake and Reservoir Management*, v. 15, n. 3, p. 185-199. <https://doi.org/10.1080/07438149909354116>

BENNETT, J.P.; RATHBUN, R.E. (1972) *Reaeration in open channel flow*. Washington, D.C.: United States Department of the Interior. 86 p.

- BICUDO, J.R.; JAMES, A. (1989) Measurement of reaeration in streams: comparison of techniques. *Journal of Environmental Engineering*, v. 115, n. 5, p. 992-1010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1989\)115:5\(992\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1989)115:5(992))
- BOTTECCHIA, O.L.A. (2009) A fórmula barométrica como instrumento de ensino em química. *Química Nova*, v. 32, n. 7, p. 1965-1970.
- COSTA, D.J.L.; GONÇALVES, J.C.S.I.; PORTO, R.M.; GIORGETTI, M.F. (2015) Modelo semi-empírico para obtenção do coeficiente de reoxigenação superficial em canais hidráulicos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 1, p. 16-23. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v20n1.p16-23>
- COSTA, O.S. (1999) *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, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- COX, B. (2003) A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland rivers. *The Science of the Total Environment*, v. 314-316, p. 303-334. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00062-7](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00062-7)
- ELMORE, H.L.; WEST, W.F. (1961) Effect of water temperature on stream reaeration. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, v. 87, n. 6, p. 59-72.
- GAMESON, A.L.H.; TRUESDALE, G.A.; DOWNING, A.L. (1955) Reaeration studies in Lakeland beck. *Journal of Institution of Water Engineers and Scientists*, v. 9, p. 57-94.
- GIORGETTI, M.F.; GIANANTI, A.E. (1983) Avaliação do nível de turbulência em águas correntes e sua correlação com o coeficiente de reaeração superficial. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 12., 1983, Camboriú. *Anais...* p. 133-138.
- GIORGETTI, M.F.; SCHULZ, H.E. (1990) Sobre o método da sonda solúvel flutuante para a determinação indireta do coeficiente de reoxigenação superficial em corpos d'água. In: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, 3., 1990, Itapema. *Anais...* p. 1079-1084.
- GONÇALVES, J.C.S.I. (2012) *Avaliação de metodologias para a determinação indireta do coeficiente de reoxigenação superficial (K_2)*. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- GONÇALVES, J.C.S.I.; COSTA, D.J.L.; SILVEIRA, A.; GIORGETTI, M.F. (2013) Reoxigenação superficial e sumidouro físico de oxigênio dissolvido em um tanque agitado por jatos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 3, p. 231-240. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v18n3.p231-240>
- GONÇALVES, J.C.S.I.; DA LUZ, M.S. (2014) Reoxigenação superficial em corpos d'água. In: HAYASHI, C. (Org.). *Tópicos de atualização em ciências aquáticas*. Uberaba: Editora da UFTM.
- GONÇALVES, J.C.S.I.; SILVEIRA, A.; LOPES JÚNIOR, G.B.; DA LUZ, M.S.; GIORGETTI, M.F. (2018) Evaluation of reaeration by convective heat transfer coefficient. *Journal of Environmental Engineering*, v. 144, n. 2. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001308](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001308)
- GONÇALVES, J.C.S.I.; SILVEIRA, A.; LOPES JÚNIOR, G.B.; DA LUZ, M.S.; SIMÕES, A.L.A. (2017) Reaeration coefficient estimate: new parameter for predictive equations. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 228, p. 307. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3491-5>
- GUALTIERI, C.; GUALTIERI, P.; DORIA, G.P. (2002) Dimensional analysis of reaeration rate in streams. *Journal of Environmental Engineering*, v. 128, n. 1, p. 12-18. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2002\)128:1\(12\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2002)128:1(12))
- GULLIVER, J.S. (1991) Discussion of "Measurement of reaeration in streams: Comparison of techniques" by J. R. Bicudo and A. James (October, 1989, v. 115, n. 5). *Journal Environmental Engineering*, v. 117, n. 5, p. 698-700. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1991\)117:5\(698\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1991)117:5(698))
- HIXSON, A.W.; CROWELL, J.H. (1931) Dependence of reaction velocity upon surface and agitation. *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 23, n. 8, p. 923-931. <https://doi.org/10.1021/ie50260a018>
- HOLGERSON, M.A.; ZAPPA, C.J.; RAYMOND, P.A. (2016) Substantial overnight reaeration by convective cooling discovered in pond ecosystems. *Geophysical Research Letters*, v. 43, n. 15, p. 8044-8051. <https://doi.org/10.1002/2016GL070206>
- JANZEN, J.G.; SCHULZ, H.E.; LAMON, A.W. (2008) Medidas da concentração de oxigênio dissolvido na superfície da água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 13, n. 3, p. 278-283. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522008000300006>
- JIN, H.S.; WHITE, D.S.; RAMSEY, J.B.; KIPPHUT, G.W. (2012) Mixed tracer injection method to measure reaeration coefficients in small streams. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 223, n. 8, p. 5297-5306. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-012-1280-8>
- KALBURGI, P.B.; JHA, R.; OJHA, C.S.P.; DESHANNAVAR, U.B. (2015) Evaluation of re-aeration equations for river Ghataprabha, Karnataka, India and development of refined equation. *Environmental Technology*, v. 36, n. 1, p. 79-85. <https://doi.org/10.1080/0/09593330.2014.937770>
- KNAPP, J.L.A.; OSENBRÜCK, K.; CIRPKA, O.A. (2015) Impact of non-idealities in gas-tracer tests on the estimation of reaeration, respiration, and photosynthesis rates in streams. *Water Research*, v. 83, p. 205-216. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.06.032>
- MARADEI, G.; VELTRI, P.; MOROSINI, A.F.; VERBENI, B. (2015) Laboratory study on the open channel flow reaeration: a dimensional approach. *Urban Water Journal*, v. 12, n. 4, p. 295-304. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.896930>
- MATEUS, M.V.; GONÇALVES, J.C.S.I.; LOPES JÚNIOR, G.B.; OKURA, M.H. (2015) Análise de incerteza e modelagem de qualidade da água do Rio Uberaba, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 37, p. 1-15. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820159914>
- MENEZES, J.P.C.; BITTENCOURT, R.P.; FARIAS, M.S.; BELLO, I.P.; DE OLIVEIRA, L.F.C.; FIA, R. (2015) Deoxygenation rate, reaeration and potential for self-purification of a small tropical urban stream. *Ambiente & Água*, v. 10, n. 4, p. 748-757. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1599>

- MOOG, D.B.; JIRKA, G.H. (1999) Air-water gas transfer in uniform channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 1, p. 3-10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:1\(3\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:1(3))
- NGUYEN, M.T.; APPAN, A.; TAN, D.S.; TAN, S.K. (2014) Influence of small water surface perturbations on the reaeration process. *Journal of Environmental Engineering*, v. 140, n. 3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000791](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000791)
- NGUYEN, M.T.; TAN, S.K. (2013) Effect of waves on reaeration. *AIChE Journal*, v. 59, n. 12, p. 4839-4845. <https://doi.org/10.1002/aic.14214>
- OMOLE, D.O.; LONGE, E.O.; MUSA, A.G. (2013) An approach to reaeration coefficient modeling in local surface water quality monitoring. *Environmental Modeling and Assessment*, v. 18, n. 1, p. 85-94.
- PALUMBO, J.E.; BROWN, L.C. (2014) Assessing the performance of reaeration prediction equations. *Journal of Environmental Engineering*, v. 140, n. 3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000799](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000799)
- PINHEIRO, A.; FAHT, G.; SILVA, M.R. (2012) Determinação do coeficiente de reaeração em rios através do uso do traçador gasoso GLP. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 17, n. 1, p. 107-116. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522012000100014>
- PÖPEL, H.J. (1979) *Aeration and gas transfer*. 2. ed. Delft: Delft University of Technology. 169 p.
- QUEIROZ, F.M.; MATOS, A.T.; VON SPERLING, M. (2015) Estimativa do coeficiente de reaeração da água em canal raso de fundo deslizante. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 20, n. 1, p. 79-88. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522015020000113819>
- SALLA, M.R.; PEREIRA, C.E.; ALAMY FILHO, J.E.; DE PAULA, L.M.; PINHEIRO, A.M. (2013) Estudo da autodepuração do rio Jordão, localizado na bacia hidrográfica do rio Dourados. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 105-114. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522013000200002>
- SHEN, X.; LIU, S.; LI, R.; OU, Y. (2014) Experimental study on the impact of temperature on the dissipation process of supersaturated total dissolved gas. *Journal of Environmental Sciences*, v. 26, n. 9, p. 1874-1878. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2014.02.002>
- STEWARTSON, M.J.; SKINNER, D. (2017) Use of environmental flows to aerate streams by modelling the counterfactual case. *Environmental Management*, v. 61, n. 3, p. 1-8. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-017-0955-8>
- STREETER, H.W.; PHELPS, E.B.A. (1925) Study of the pollution and natural purification of the Ohio River. *U.S. Public Health Service*, n. 146, 75 p.
- TAMBURRINO, A.; ARAVENA, C. (2002) Reaeration coefficient determined from agitated water tank experiments. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING, 5, 2002, Varsóvia. *Anais...*
- TSIVOGLIOU, E.C.; WALLACE, J.R. (1972) *Characterizing stream reaeration capacity*. Rep. No. EPA-R3-72-012. Washington, DC.: U.S. Environmental Protection Agency.