

ANAIIS

Volume 01

50SSS

Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis



Porto Alegre/RS, 2019



Copyright © 2019, by Editora GFM.

Direitos Reservados em 2019 por Editora GFM.

Editoração: Cristiano Poletto

Organização Geral da Obra: Cristiano Poletto; Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves; Fernando Periotto

Diagramação: Espaço Histórico e Ambiental

Revisão Geral: Angela Gunther

Capa: Espaço Histórico e Ambiental

CIP-Brasil. Catalogação na Fonte

Cristiano Poletto; Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves; Fernando Periotto
(Organizadores)

ANAIS do 5º Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis - Vol. 1 / Cristiano Poletto;
Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves; Fernando Periotto (Organizadores) – Porto
Alegre, RS: Editora GFM, 2019.

1.537p.: il.; 29,7 cm

ISBN 978-85-6030-896-5

***É AUTORIZADA a livre reprodução, total ou parcial, por quaisquer meios, sem
autorização por escrito da Editora ou dos Organizadores.***

5SSS220

EFEITO DE SURFACTANTE ANIÔNICO SOBRE O COEFICIENTE DE REAERAÇÃO SUPERFICIAL

Murilo de Souza Ferreira¹, Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves², Thiago Vinicius Ribeiro Soeira³, Deusmaque Carneiro Ferreira⁴, Mário Sergio da Luz⁵, Cristiano Poletto⁶

1Universidade de São Paulo, e-mail: sfmurilo1@gmail.com; 2Universidade Federal do Triângulo Mineiro, e-mail: sigjulio@gmail.com; 3Universidade Federal do Triângulo Mineiro, e-mail: tvribeiro88@hotmail.com;

4Universidade Federal do Triângulo Mineiro, e-mail: deusmaque@hotmail.com; 5Universidade Federal do Triângulo Mineiro, e-mail: mariosergiodaluz2013@gmail.com; 6Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: cristiano.poletto@ufrgs.br

Palavras-chave: reaeração superficial; surfactantes, modelagem da qualidade da água

Resumo

A reaeração superficial é um importante fenômeno que ocorre nos escoamentos naturais, uma vez que ela é a principal responsável pela recuperação dos níveis de oxigênio dissolvido (OD). Ela pode ser quantificada pelo coeficiente de reaeração (K_2). Os modelos utilizados para previsão e avaliação da concentração de OD são na maioria dos casos sensível ao K_2 , logo, uma estimativa incorreta desse coeficiente pode conduzir a prejuízos de natureza econômica e ambiental. O K_2 é influenciado por diversos fatores como: hidrodinâmica do escoamento, temperatura da água, e presença de surfactantes no meio. Apesar dos avanços no entendimento de como a hidrodinâmica na interface influencia a reaeração, poucos estudos investigaram o efeito dos surfactantes sobre o K_2 . O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do surfactante Dodecil Sulfato de Sódio (SDS) sobre o coeficiente de reaeração. A escolha deste surfactante deve-se ao fato de que ele está presente na maioria dos detergentes comerciais e, conseqüentemente, é encontrado no ambiente aquático. Os experimentos de reaeração foram realizados em um reator cilíndrico com agitador mecânico tipo turbina e em um canal hidráulico circular. No total foram realizados 15 experimentos de reaeração no reator cilíndrico. Cada experimento foi caracterizado pelo par: concentração de SDS (0,0; 0,25; 0,50; 1,0; 1,5 mMol L⁻¹) e velocidade de rotação (25, 50 e 100 rpm) do agitador. No canal hidráulico circular, os experimentos foram realizados em triplicata, considerado quatro níveis de agitação da água (número de Reynolds): 4.500, 37.500, 49.200, 54.000. Contudo, apenas duas concentrações de SDS foram utilizadas: concentração zero e a concentração que produziu maior efeito sobre K_2 nos ensaios realizados no reator cilíndrico (1,5 mMol L⁻¹). No total, 24 experimentos foram realizados no canal. Os resultados, no reator, mostraram que, independente do nível de agitação da água, o surfactante reduziu o coeficiente de reaeração, em aproximadamente 20%, quando a concentração de SDS atingiu 1,5 mMol L⁻¹. Esta redução ocorreu devido à formação de um filme superficial na interface que dificultou a transferência do oxigênio do ar para a água. Este fenômeno é conhecido como efeito barreira. Por outro lado, no canal hidráulico, a redução de K_2 (aproximadamente 15%) ocorreu apenas para os níveis de maior turbulência (Reynolds = 49.200 e 54.000). Isso pode ser explicado pelo fato de que, na presença de surfactantes e em baixos níveis de turbulência, fenômenos que aumentam o K_2 (*i.e.*, efeito de Marangoni) podem coexistir com fenômenos que reduzem K_2 (*i.e.*, efeito barreira). Este estudo mostrou que a presença de SDS em corpos d'água deve ser considerada na estimativa do coeficiente de reaeração superficial, uma vez que este surfactante reduz a transferência de oxigênio para água. A não consideração de SDS nos corpos d'água pode conduzir a superestimativa do K_2 em até 20%, dependendo do valor da concentração de SDS e do nível de turbulência do escoamento.

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). Recentemente, devido ao aumento da preocupação com o aquecimento global, há um intenso interesse no estudo da transferência, entre a atmosfera e a água, de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases de efeito estufa. Estima-se que 30 a 40% do CO₂ emitido pelas atividades humanas é absorvido pelo oceano; entretanto, essa estimativa é significativamente afetada pela incerteza na previsão da taxa de transferência de gases na interface ar-água (Banerjee, 2007).

Mesmo no contexto atual, que impõe o estudo dos gases ligados aos efeitos de aquecimento atmosférico, atenção especial ainda deve ser mantida para a transferência de oxigênio (Janzen et al., 2008). Na prática, o interesse neste assunto relaciona-se à modelagem da dinâmica do oxigênio dissolvido (OD) a jusante de fontes orgânicas de poluição; uma vez que o processo de biodegradação dos resíduos orgânicos provoca o decaimento da concentração de OD (Mateus et al., 2015). Em rios, a principal

fonte para o restabelecimento do OD é a transferência de oxigênio na interface ar-água. Este fenômeno é também conhecido como reaeração superficial. O avanço no conhecimento da absorção de oxigênio pelo corpo d'água resulta em uma melhora na quantificação da taxa de reaeração, a qual é parâmetro essencial dos modelos de qualidade da água, nos quais se baseiam as análises ambientais e de recuperação de corpos hídricos (Gonçalves et al., 2017; Gonçalves et al., 2018; Ferreira et al., 2019).

A transferência de gases é controlada por uma complexa interação entre difusão molecular e fenômenos turbulentos junto à interface. Assumindo que o processo de transferência é horizontalmente homogêneo, a taxa de massa de oxigênio através da interface ar-água é usualmente expressa por:

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

em que: V é o volume do corpo d'água, A a área da interface ar-água, C a concentração de OD, C_s a concentração de saturação de OD, K_L o coeficiente de transferência de massa de OD, e t o tempo. A relação $K_L A/V$ é denominada coeficiente de reaeração superficial, a qual é normalmente representada pelo parâmetro K_2 .

Desde o início do século XX, diversos pesquisadores realizaram esforços com o objetivo de entender o processo de transferência de massa de oxigênio e desenvolver modelos conceituais e empíricos capazes de relacionar o coeficiente K_2 a parâmetros físicos do escoamento (Lewis e Whitman, 1994; Moog e Jirka, 1999; Gualtieri et al. 2002; Herlina, 2005). Apesar dos avanços no entendimento de como a hidrodinâmica na superfície livre influencia a transferência interfacial de massa, poucos estudos investigaram o efeito de filmes superficiais como, por exemplo, os compostos surfactantes (ou tensoativos) sobre o K_2 . A maioria das pesquisas destaca que a presença de surfactantes pode reduzir o coeficiente K_2 , devido à formação de um filme superficial que dificulta a transferência do oxigênio atmosférico para o meio líquido (Rosso et al., 2006; Jamnongwong et al., 2010). Enquanto outras pesquisas reportaram que a presença de surfactantes aumenta a variabilidade de K_2 em diferentes níveis de turbulência (Mackenna e McGillis, 2004).

Os compostos surfactantes são frequentemente empregados na fabricação de fármacos, cosméticos e detergentes (Moraveji et al., 2011). Eles atingem o corpo d'água devido ao lançamento de águas residuárias (sem ou com algum tipo de tratamento). No meio aquoso, os surfactantes possuem duas formas: monômeros e micelas. Os monômeros possuem regiões hidrofílicas e hidrofóbicas. As micelas são grandes agregados de monômeros de dimensões moleculares. A concentração de surfactantes na qual elas são formadas é denominada concentração micelar crítica (CMC). Acima da CMC, o filme superficial passa a ser praticamente homogêneo e a força de coesão das moléculas de surfactante junto à superfície torna-se pouco alterada (Behring et al., 2004)

O estudo do efeito de surfactantes sobre a transferência de oxigênio na interface ar-água deve ser realizado em laboratório, onde é possível isolar a influência de outros fatores sobre o fenômeno de transferência (*e.g.*, temperatura, salinidade da água, pH, etc). Adicionalmente, em laboratório é possível realizar um estudo mais sistemático a partir da variação da concentração da substância analisada e da variação do nível de turbulência na superfície.

O estudo de reaeração superficial em laboratório exige a utilização de sistemas de agitação da água (*e.g.*, tanques com grade oscilante, tanques com agitador mecânico tipo turbina, canais hidráulicos com recirculação e tanques agitados por jatos). A justificativa básica para o uso desses equipamentos é que eles geram turbulência de forma controlada, adicionada ao fato de que a turbulência atinge a superfície por propagação, de baixo para cima, similarmente ao que ocorre em alguns ambientes naturais, preferencialmente em rios (Janzen et al., 2008).

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo atender uma demanda relacionada ao estudo da transferência de massa de oxigênio e o efeito de compostos surfactantes sobre o K_2 . O composto com característica tensoativa analisado foi o Dodecil Sulfato de Sódio (SDS) que é um surfactante aniônico presente na maioria dos detergentes comerciais e, conseqüentemente, é comumente encontrado no ambiente aquático. Para tanto, experimentos de reaeração foram realizados em um reator com agitador mecânico tipo turbina e em um canal hidráulico circular, em concentrações de surfactantes que foram desde zero até a CMC.

Material e Métodos

Aparatos e Reagentes

Os experimentos foram realizados em um reator cilíndrico com agitação mecânica tipo turbina e em um canal hidráulico circular (Figura 1).

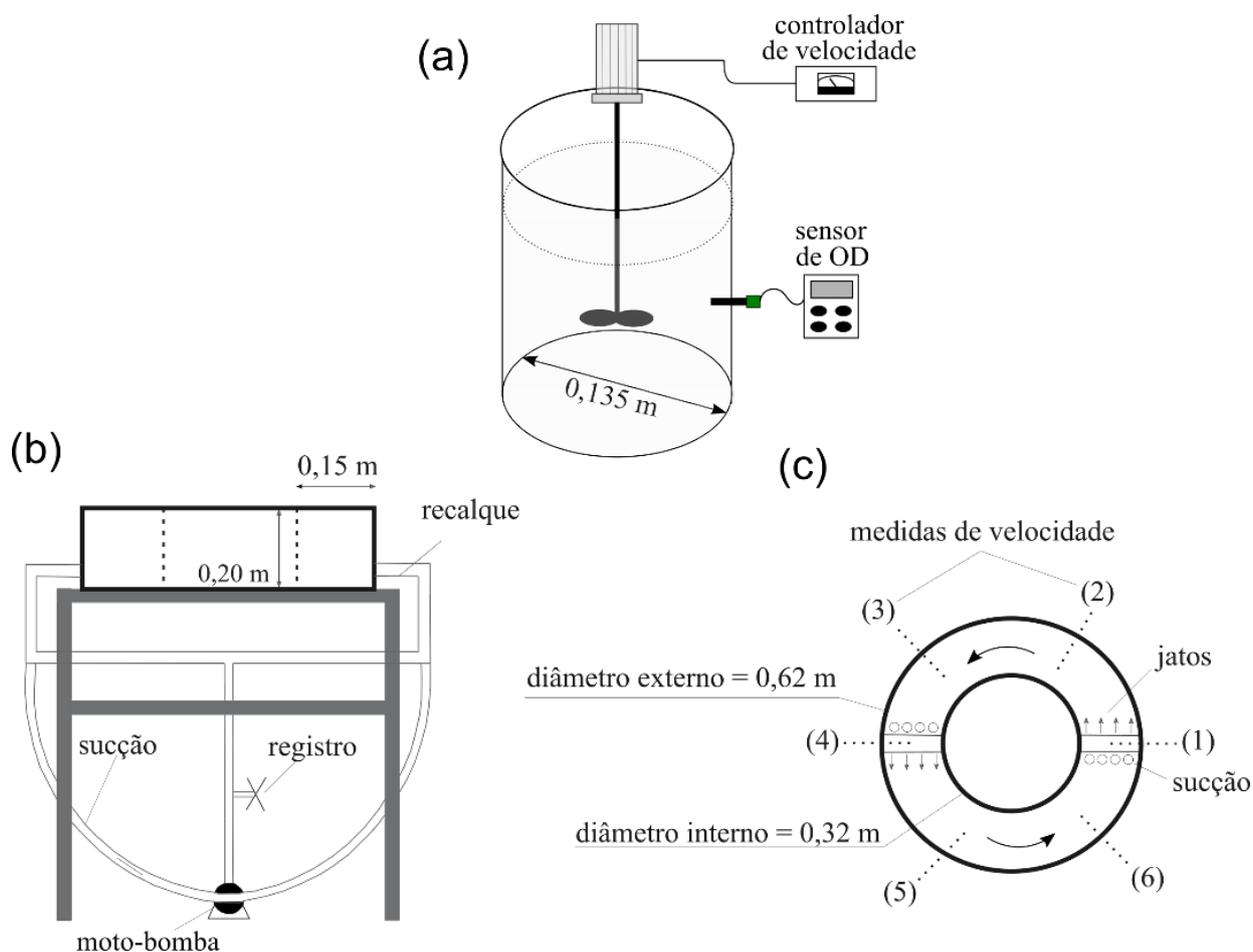


Figura 1: Aparatos experimentais: (a) reator cilíndrico com agitador mecânico, (b) corte longitudinal do canal hidráulico circular, (c) vista superior do canal hidráulico circular

O reator tinha diâmetro de 0,135 m e volume de 2 L. Um agitador tipo turbina, com duas lâminas, foi usado para controlar a turbulência interfacial por meio do ajuste da velocidade de rotação, a qual variou na faixa 25 rpm a 100 rpm.

O canal hidráulico circular foi construído com polímero reforçado com fibra de vidro. A água foi recirculada com o uso de um sistema moto-bomba de 0,25 cv de potência, em dois pontos de sucção e recalque, distribuídos ao longo do perfil longitudinal do canal.

A turbulência proporcionada pelos jatos que tangenciavam o fundo produziu o escoamento da água. O canal funcionou em circuito fechado, sem interrupção da superfície livre, e os experimentos foram realizados por um período de 3 a 8 horas, sendo que o fenômeno da reaeração e a ação do surfactante estivessem limitados somente à superfície livre do canal.

A estabilização da temperatura durante os experimentos foi realizada por meio de um trocador de calor tipo serpentina, fixado junto à parede interna do canal e abastecido constantemente com água gelada. Para a obtenção de diferentes velocidades (U) e níveis de turbulência, foi instalado na tubulação de recalque um registro. A velocidade do escoamento foi medida com o uso de um micromolinetete (acurácia de 1%) em seis diferentes pontos ao longo do canal, e na profundidade equivalente a 50% da lâmina d'água. Os diferentes níveis de turbulência foram caracterizados de acordo com o número de Reynolds (Equação 2). A descrição das condições hidráulicas estabelecidas no canal é mostrada na Tabela 1.

$$Rey = \frac{UH}{\nu} \quad (2)$$

em que: U é a velocidade do escoamento ($m\ s^{-1}$), H a profundidade (m) e ν a viscosidade cinemática ($m^2\ s^{-1}$).

Tabela 1: Condições hidráulicas estabelecidas no canal hidráulico circular

Experimentos	U (m s ⁻¹)	Rey (-)	H (m)	Volume (L)
1	0,03	4.500	0,15	32,6
2	0,25	37.500	0,15	32,6
3	0,41	49.200	0,12	26,4
4	0,60	54.000	0,09	20,2

Durante todos os experimentos, os aparatos foram mantidos em uma sala, com temperatura controlada. O oxigênio dissolvido e a temperatura da água foram medidos com o uso de uma sonda multiparâmetros (Hach modelo HQ40D) com sensor LDO 101 acoplado (exatidão 0,1 mg L⁻¹).

O surfactante aniônico utilizado nos experimentos de reaeração foi o Dodecil Sulfato de Sódio (SDS), ultrapuro (Sigma Aldrich, 99%). A CMC do surfactante foi determinada por Mateus et al. (2019), utilizando o método da condutividade elétrica. Eles mostraram que, para água usada neste estudo (*i.e.*, água de torneira com salinidade de 80 mg L⁻¹), a CMC está na faixa de 1,5 a 1,6 mMol L⁻¹.

Experimentos de Reaeração Superficial

Os experimentos de reaeração foram realizados sob pressão atmosférica (938,2 hPa). As soluções eram preparadas nos próprios aparatos, misturando o sal de SDS no fluido base (água de torneira, salinidade de 80 mg L⁻¹).

Os experimentos de reaeração foram realizados usando a técnica do distúrbio do equilíbrio. Inicialmente, o oxigênio dissolvido era removido da solução usando nitrogênio gasoso (método de *Stripping*). Quando a concentração de oxigênio atingia valores próximos a 2 mg L⁻¹, a mangueira de nitrogênio era retirada do aparato e iniciava-se a etapa de reaeração. O experimento era interrompido quando a concentração de OD aproximava-se de concentração de saturação. A concentração de saturação variou de 6,5 a 8,0 mg L⁻¹, uma vez que ela é função da temperatura da solução, salinidade e pressão atmosférica.

O ajuste da solução analítica da Equação 1 aos dados observados e, conseqüentemente, a estimativa de K₂ foi realizada com uso da técnica de análise de regressão não-linear. A solução analítica da Equação 1 é:

$$C(t) = C_s - (C_s - C_0) \exp(-K_2 t) \quad (3)$$

em que C(t) é a concentração de OD em determinado tempo (mg L⁻¹), C_s concentração de saturação de OD na água (mg L⁻¹), C₀ a concentração inicial de OD (mg L⁻¹), K₂ coeficiente de reaeração (dia⁻¹), t o tempo (dia).

A variação da temperatura da água em cada experimento foi menor do que 3°C. Todos os valores de K₂ foram corrigidos para a temperatura de 20°C. Para isso, a equação de Arrhenius simplificada foi utilizada:

$$K_2(20) = \frac{K_2(T)}{e^{\theta(T-20)}} \quad (4)$$

em que T é a temperatura média da água nos experimentos de reaeração (°C), θ é o coeficiente de correção da temperatura, cujo valor adotado foi de 1,0241, como recomendado por Elmore e West (1961).

No total foram realizados 15 experimentos de reaeração no reator cilíndrico. Cada experimento foi caracterizado pelo par: concentração de SDS (0,0; 0,25; 0,50; 1,0; 1,5 mMol L⁻¹) e velocidade de rotação (25, 50 e 100 rpm). A duração dos experimentos variou de (12 horas a 18 horas). Os experimentos realizados neste reator foram utilizados para identificar qual concentração de SDS produz maior efeito sobre o K₂.

No canal hidráulico circular, os experimentos foram realizados em triplicata para cada número de Reynolds. Contudo, apenas duas concentrações de SDS foram utilizadas: concentração zero e a concentração que produziu maior efeito sobre K₂ nos ensaios realizados no reator cilíndrico. No total, 24 experimentos foram realizados no canal, com duração que variou de 1,5 a 8,0 horas.

A avaliação do efeito do SDS sobre o K₂ foi realizada por meio do fator α (Equação 5). Essa metodologia de avaliação gerou resultados consistentes em pesquisas desenvolvidas por Gillot et al. (2000) e Jammongwong et al. (2010). Se α é igual a 1, significa que o surfactante não influencia no fenômeno de reaeração. Quando α é maior do que 1, o surfactante acelera a transferência de massa de oxigênio para a água, e quando α é menor do que 1, significa que o surfactante representa uma resistência à transferência de oxigênio.

$$\alpha = \frac{K_2 \text{ com SDS}}{K_2 \text{ sem SDS}} \quad (5)$$

em que: α é o fator de relação entre os K_2 da água com e sem SDS (adimensional).

Resultados e Discussão

Reaeração Superficial

Na Figura 2 são mostradas as curvas de reaeração superficial, sem SDS, geradas em diferentes velocidades de rotação do agitador mecânico (Figura 2a), e diferentes números de Reynolds do canal hidráulico circular (Figura 2b). Observa-se o excelente ajuste entre a Equação 2 e os dados experimentais. O ajuste apresentou $R^2 > 0,96$ para todos os experimentos. Com base neste resultado, a Equação 2 pode ser usada para modelar o fenômeno de reaeração superficial nos aparatos usados neste estudo. Nota-se também que as curvas de reaeração atingem a concentração de saturação de OD mais rápido à medida que o nível de agitação se eleva no reator cilíndrico (*i.e.*, aumento da velocidade de rotação da turbina) e no canal hidráulico circular (*i.e.*, aumento do número de Reynolds). Quanto maior a agitação maior a turbulência interfacial. Essa turbulência tem um papel fundamental para a troca de oxigênio na interface, uma vez que ela reduz a espessura da camada limite, aumentando o gradiente de concentração e, conseqüentemente, a difusão do oxigênio na água (Janzen et al., 2010; Zhang et al., 2013).

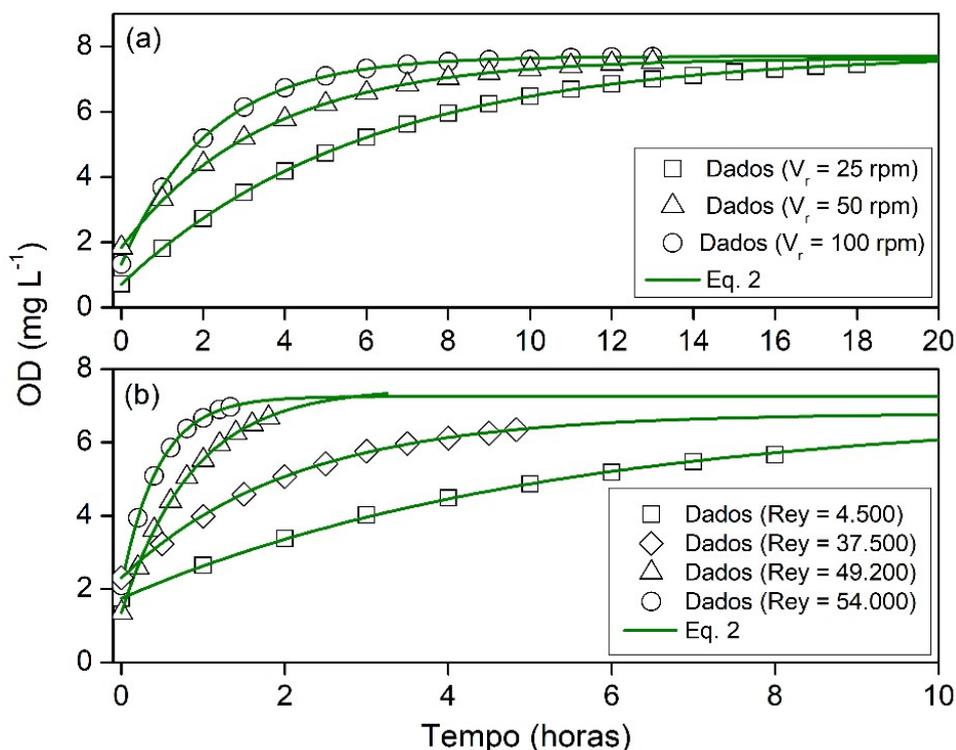


Figura 2: Curvas de reaeração superficial. (a) reator cilíndrico com agitação mecânica tipo turbina e (b) canal hidráulico circular

Efeito do surfactante SDS sobre o coeficiente de reaeração superficial

Na Figura 3 são apresentados os valores do coeficiente de reaeração para o reator, considerando os três níveis de turbulência analisados e as cinco concentrações de SDS. Adicionalmente são mostrados também o fator de relação α .

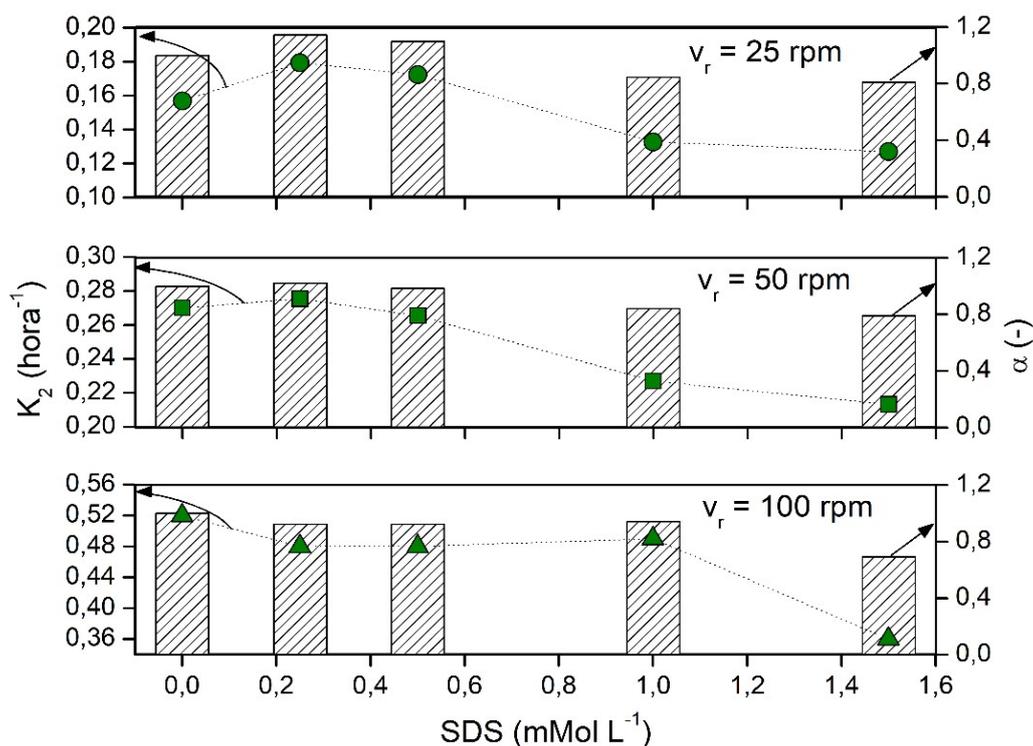


Figura 3: Efeito do SDS sobre o coeficiente de reaeração no reator cilíndrico com agitação mecânica tipo turbina

É possível observar que, para concentrações de até $0,5 \text{ mMol L}^{-1}$, o SDS tem pouco efeito sobre K_2 . Entretanto, em todos os níveis de agitação, o valor de K_2 diminuiu, em torno de 20% ($\alpha = 0,8$), quando a concentração de SDS atingiu a concentração micelar crítica (SDS = $1,5 \text{ mMol L}^{-1}$). Resultados semelhantes a essa redução do K_2 na zona da CMC foram obtidos por Rosso et al. (2006), que realizaram experimentos de reaeração por ar difuso, e obtiveram uma redução do K_2 de aproximadamente 30 a 70% para a água pura. A maior redução nesta faixa de concentração pode ser explicada pelo fato de que o filme superficial, responsável pela resistência a transferência de massa de oxigênio, está completamente formado quando a concentração de surfactante atinge a CMC, como apresentado por (Santos et al., 2007). Um esquema para mostrar a ocupação da superfície pelas moléculas do surfactante é mostrado na Figura 4. Observa-se que, para concentrações inferiores à CMC, o filme superficial não está completamente formado. Por outro lado, na CMC, toda a superfície livre está ocupada pelas moléculas do surfactante. Essa condição reduz o coeficiente de difusão de oxigênio, conforme mostrado por Jamnongwong et al. (2010) e Jimenez et al. (2014). Adicionalmente, o filme superficial pode reduzir o número de movimentos de rompimento de superfície, os quais são resultado de turbilhões que atingem a superfície de modo randômico (Mckenna e McGillis, 2004). Esses movimentos são essenciais para renovação da superfície e transferência de oxigênio na interface. A resistência causada pelo filme superficial a transferência de oxigênio é conhecida como efeito barreira.

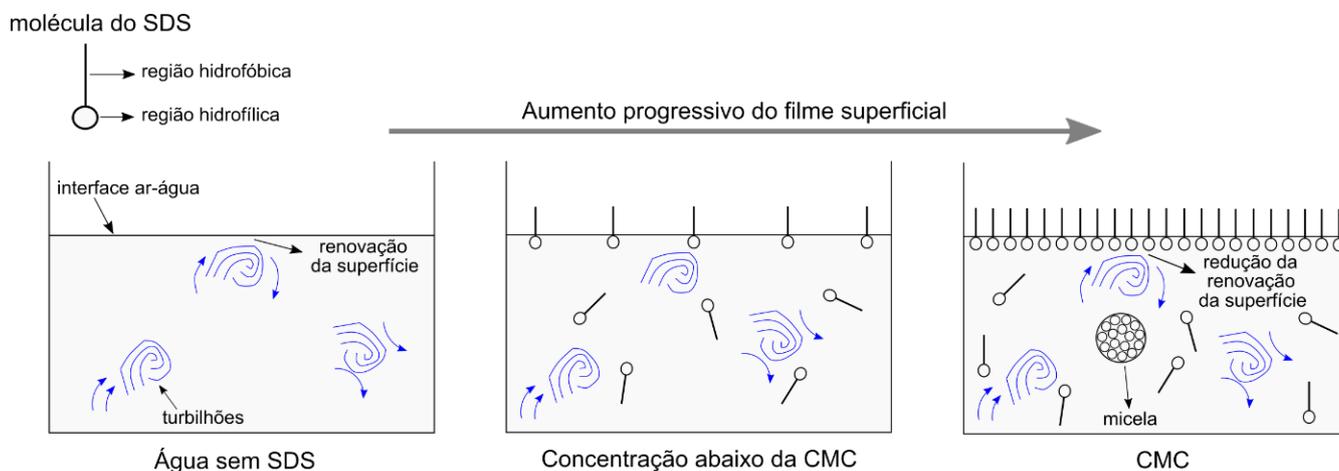


Figura 4: Esquema representativo do comportamento das moléculas de SDS na interface ar-água

A Figura 5 mostra os valores de α para o canal hidráulico circular quando a concentração de SDS atinge a CMC (1,5 mMol L⁻¹). É possível observar que os menores valores de α (aproximadamente 0,85) foram obtidos quando o escoamento no canal estava mais turbulento (Reynolds 49.200 e 54.000). Nota-se que, para os menores valores de Reynolds, o SDS não produziu efeitos sobre o K_2 ($\alpha = 1$). Isso pode ser explicado pela existência de um outro fenômeno sobre a transferência de oxigênio, além do efeito barreira produzido pelo filme superficial. Este fenômeno é conhecido como efeito de Marangoni. Ele ocorre em baixos números de Reynolds e atua no sentido de acelerar a transferência de oxigênio, contrariamente ao efeito produzido pelo filme superficial. Zhang et al. (2013) mostrou que o efeito de Marangoni só é significativo em baixos níveis de agitação da água e ocorre devido à formação de um gradiente de tensão superficial próximo à superfície. Em elevados níveis de turbulência, o efeito Marangoni torna-se insignificante.

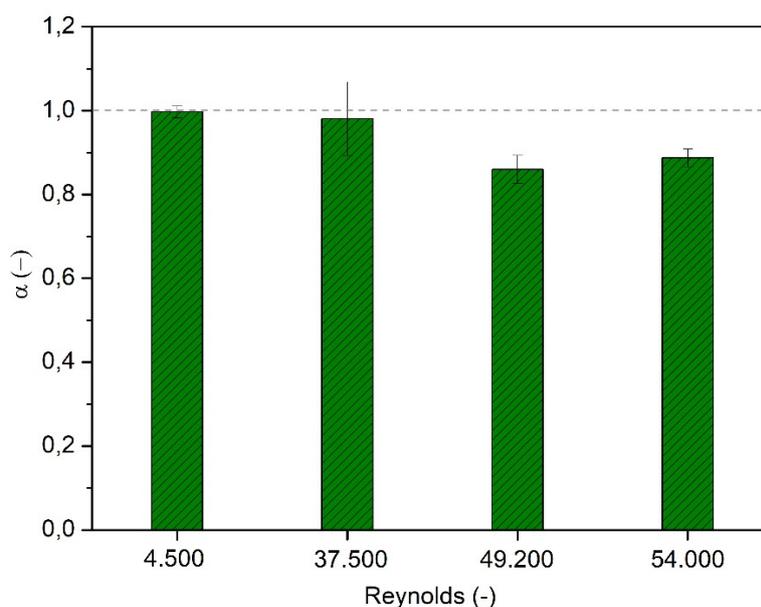


Figura 5: Efeito do SDS sobre α no canal hidráulico circular

O gradiente de tensão superficial, formado pela existência de um gradiente de concentração de SDS, produz movimentos convectivos na camada limite da interface ar-água, que por sua vez, renova a superfície aumentando a transferência de oxigênio (Zhang et al., 2013). Um diagrama esquemático das correntes convectivas formadas pelo efeito de Marangoni na interface é mostrado na Figura 6.

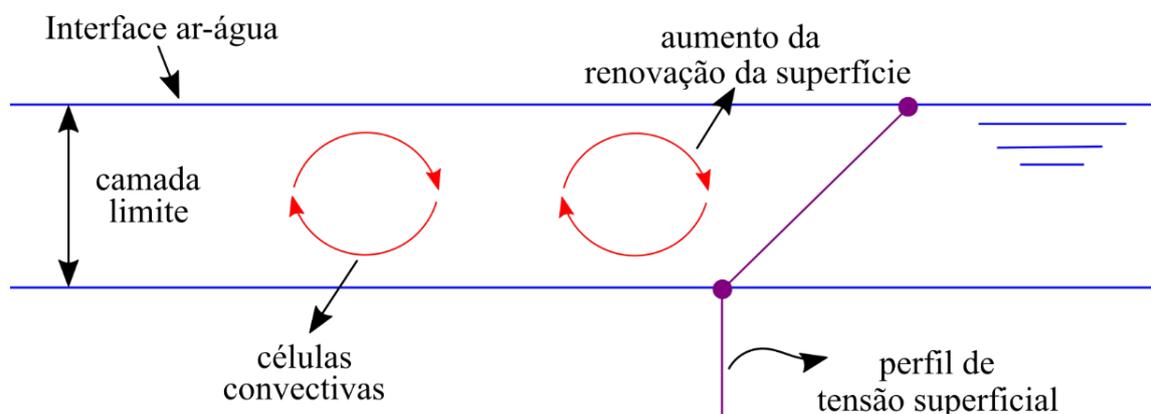


Figura 6: Esquema representativo do efeito Marangoni na interface ar-água na presença de surfactante

Comentários finais

Este trabalho avaliou o efeito do surfactante SDS sobre o fenômeno de reeração superficial. Para tanto, foi utilizado um reator com agitação mecânica tipo turbina e um canal hidráulico circular. As principais conclusões são:

- O SDS reduz o coeficiente de reaeração superficial em torno de 20% no reator e 85% no canal hidráulico circular;
- A maior redução ocorre quando a concentração de SDS atinge a CMC. Nesta condição, a interface ar-água está totalmente ocupada pelas moléculas de SDS e, por isso, o efeito barreira é máximo; e
- Em baixa turbulência, o efeito do SDS sobre o coeficiente de reaeração é inexistente, já que, para esta condição, coexistem fenômenos que reduzem (efeito barreira) e aumentam (efeito Marangoni) o coeficiente de reaeração superficial.

O SDS é um surfactante presente em vários detergentes comerciais. Este estudo mostrou que a presença desse composto deve ser considerada na estimativa do coeficiente de reaeração superficial, uma vez que este é um importante parâmetro dos modelos de qualidade da água, os quais são usados para a estimativa da capacidade de autodepuração de escoamentos naturais.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências Bibliográficas

- Banerjee, S.; 2007. The air water interface: turbulence and scalar exchange. In: Garbe, C. S.; Handler, R.A.; Jahne, b. (Org). Transport at the air-sea interface: measurements, models and parametrizations. Springer – Berlin. p. 87-101.
- Behring, J. L. et al.; 2004. Adaptação no método do peso da gota para determinação da tensão superficial: um método simplificado para a quantificação da cmc de surfactantes no ensino da química. Química Nova, v. 27, n. 3, 492 -495.
- Elmore, H. L.; West, W. F.; 1961. Effect of water temperature on stream aeration. J. Sanitary Eng. Div., ASCE, 87, No. SA6, 59-71.
- Ferreira, M. S.; Oliveira, R.V.; Urzêdo, L. E. S.; Júnior, G. B. L.; Gonçalves, J. C. S. I. 2019. Estimativa do coeficiente de transferência de massa de oxigênio com o uso da técnica das sondas solúveis flutuantes: um estudo de laboratório. Eng. Sanitária e Ambient. 1–12. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019173205>.
- Gillot, S.; Capela, S.; Heduit, A. A.; 2000. Effect of horizontal flow on oxygen transfer in clean water and clean water with surfactants. Water Research, v. 34, n. 2, p. 678-683.
- 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; (228)307: 1-10.
- 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; 144(2): 0401709.
- Gualtieri, C.; Gualtieri, P.; Doria, G. P.; 2002. Dimensional analysis of reaeration rate in streams. J. of Environmental Engineering. v. 128, n. 1.
- Herlina, V.; 2005. Gas transfer at the air-water interface in a turbulent flow environment.
- Jamnongwong, M. et al.; 2010. 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, n. 3, p. 758–768.
- Janzen, G. J; Schulz, H. E.; Lamon, A. W.; 2008. Medidas da concentração de oxigênio dissolvido na superfície da água. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 13, n. 3.
- Janzen, J. G. et al.; 2010. Estimation of mass transfer velocity based on measured turbulence parameters. AIChE Journal, v. 56, n. 8, p. 2004–2017.
- Jimenez, M. et al.; 2014. Oxygen mass transfer and hydrodynamic behaviour in wastewater: Determination of local impact of surfactants by visualization techniques. Water Research, v. 58, p. 111–121.
- Lewis, W. K.; Whitman, W. G.; 1924. Principles of gas absorption. Absorption Symposium Industrial and Engineering



Chemistry. v. 16, n. 12, p. 1215-1210.

Mateus, M. V.; Gonçalves J. C. S. I.; Lopes Junior G. L.; Okura, M. H. 2015. Análise de incerteza e modelagem de qualidade da água do Rio Uberaba, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*; 37: 1-15.

Mateus, M. V. et al.; 2019. Molecular interactions and modeling of anionic surfactant effect on oxygen transfer in a cylindrical reactor. *Environmental Engineering Science*, v. 36, n. 2, p. 180–185.

Mckenna, S. P.; McGillis, W. R.; 2004. The role of free-surface turbulence and surfactants in air-water gas transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 47, n. 3, p. 539–553.

Moog, D. B; Jirka, G. H.; 1999. Air-water gas transfer in uniform channel flow. *J. Hydraul. Eng., ASCE*, v. 125. Jan.

Moraveji, M. K.; Pasand, M. M.; Davarnejad, R.; Chisti, Y.; 2011. Effects of surfactants on hydrodynamics and mass transfer in a split-cylinder airlift reactor. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 90, n. 1, p. 93-99.

Rosso, D.; Huo, D. L.; Stenstrom, M. K.; 2006. Effects of interfacial surfactant contamination on bubble gas transfer. *Chemical Engineering Science*, v. 61, p. 5500–5514.

Santos, F. K. G. et al.; 2007. Determinação da concentração micelar crítica de tensoativos obtidos a partir de óleos vegetais para uso na recuperação avançada de petróleo. 4º PDPETRO, Campinas, SP, 21-24.

Zhang, S. et al. 2013. Gas-liquid mass transfer in the presence of ionic surfactant: Effect of counter-ions and interfacial turbulence. *Surface and Interface Analysis*, v. 45, n. 7, p. 1152–1157.