

IV-099 - AVALIAÇÃO DO EFEITO SURFACTANTE SOBRE A REAERAÇÃO SUPERFICIAL EM UM CANAL HIDRÁULICO CIRCULAR

Murilo de Souza Ferreira⁽¹⁾

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

Deusmaque Carneiro Ferreira⁽²⁾

Licenciatura em Química pela Universidade de Uberaba. Especialista em Química pela Universidade Federal de Lavras. Mestrado e Doutorado em Química na área de Eletroquímica Aplicada pela Universidade Federal de Uberlândia. Professor Adjunto I da Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves⁽³⁾

Engenheiro Ambiental pelo Instituto de Ensino Superior COC. Mestrado e Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professor adjunto III da Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

Endereço⁽¹⁾: 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 fenômeno físico responsável por garantir a transferência de oxigênio dissolvido (OD) na interface ar-água de um corpo d'água natural. Esse fenômeno pode ser quantificado pelo coeficiente de reaeração superficial (K_2). O K_2 é influenciado por diversos fatores, entre eles: temperatura, pressão atmosférica, compostos surfactantes, entre outros. Os compostos surfactantes encontram-se presentes nos recursos hídricos principalmente devido à poluição gerada por águas residuárias. A elevada concentração de surfactantes na água pode originar a formação de agregados moleculares chamados micelas, que por sua vez, alteram as características físico-químicas do meio aquoso. Este trabalho objetivou estudar a influência de um composto surfactante sobre o K_2 em um canal hidráulico circular. Para tanto, foram realizados 44 experimentos de reaeração superficial em quatro níveis de turbulência e três diferentes lâminas de água. O surfactante utilizado foi o Lauril Sulfato de Sódio (SDS). Para cada experimento de reaeração 11 diferentes concentrações do surfactante, próximas à concentração micelar crítica (CMC), foram utilizadas. Os resultados obtidos demonstraram que devido à presença de contra-íons na água utilizada ocorreu uma antecipação da CMC, reduzindo-a em aproximadamente 80%. A avaliação da ação do SDS sobre o K_2 resultou na atuação de diversos efeitos, sendo eles: o efeito de Marangoni e o filme superficial. Pode-se concluir que os efeitos do SDS sobre o K_2 foram dinâmicos, e resultaram em uma variação do K_2 de $\pm 20\%$ ($\alpha = 0,8$ a $1,2$). Conclui-se que o K_2 é influenciado pela presença da concentração do surfactante na água, entretanto mais pesquisas são necessárias, utilizando outros tipos de surfactantes e estruturas geradoras de turbulência, para compreender individualmente a influência de cada efeito sobre o K_2 .

PALAVRAS-CHAVE: Coeficiente de reaeração, Qualidade da água, Tensoativos, SDS.

INTRODUÇÃO

O oxigênio dissolvido (OD) presente em um corpo d'água é um importante parâmetro químico de qualidade da água, uma vez que, a biota aeróbia aquática requer níveis adequados de OD para sobreviver. A principal fonte responsável por introduzir o OD no meio aquático é a reaeração superficial. Entretanto, a respiração da biota aeróbia é o principal fator que reduz o OD do meio aquático.

A reaeração superficial é um fenômeno físico de transferência de massa de oxigênio na interface ar-água, que ocorre em corpos d'água naturais, e é responsável por garantir a reestabilização da concentração de oxigênio dissolvido (OD) no meio aquático. Este fenômeno é quantificado por um coeficiente, denominado coeficiente de reaeração (K_2). O K_2 pode ser influenciado por diversos fatores, sendo os principais: umidade atmosférica, temperatura, turbulência da superfície e compostos surfactantes.

O coeficiente K_2 é um importante parâmetro em modelos matemáticos aplicados na gestão da qualidade dos recursos hídricos e também em modelos de metabolismo aquático, o que justifica a necessidade de obter uma estimativa confiável deste coeficiente.

Os compostos surfactantes presentes nos recursos hídricos, oriundos principalmente de águas residuárias, são frequentemente empregados na fabricação de fármacos, cosméticos e detergentes. (MORAVEJI *et al.*, 2011). No meio aquoso, os surfactantes possuem duas formas, monômeros (livres) e micelas (agregado de moléculas anfipáticas). Os monômeros possuem regiões hidrofílicas e hidrofóbicas e, em uma concentração específica de surfactante na água, ocorre à formação de micelas, que correspondem a agregados moleculares de dimensões coloidais compostas pelas interações de vários monômeros. Essa concentração é denominada de Concentração Micelar Crítica (CMC), vale ressaltar que um filme superficial geralmente é formado a partir do momento que a CMC é atingida no meio aquoso (RIZZATTI *et al.*, 2009).

Apesar dos avanços em estudos que envolvem a hidrodinâmica da superfície e o fenômeno de reaeração superficial, poucos estudos retratam o efeito de filmes superficiais oriundos de compostos surfactantes 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; MCGILLIS, 2004).

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

O objetivo do presente estudo foi avaliar a influência do gradiente de concentração de um surfactante aniônico sobre o coeficiente K_2 , e verificar o efeito do surfactante sobre algumas propriedades físico-químicas da água, a fim de auxiliar na estimativa e determinação deste coeficiente.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado em um canal hidráulico circular (Figura 1). Este aparato visou simular a turbulência existente nos corpos d'água naturais (ambientes lóticos). 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.

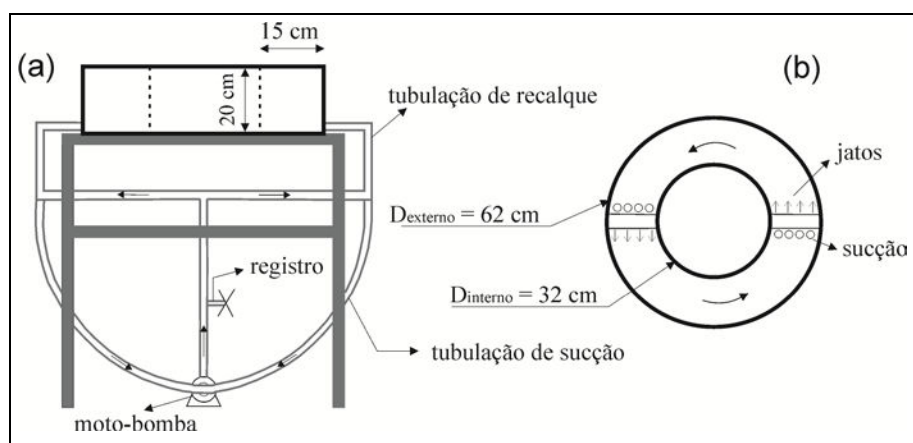


Figura 1: Esquema do canal hidráulico circular: (a) corte longitudinal; (b) vista superior.

A turbulência proporcionada pelos jatos que tangenciavam o fundo produziu o escoamento no canal. 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 superficial 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, e os diferentes níveis de turbulência foram caracterizados de acordo com o número de Reynolds (Equação 1). A descrição das condições físicas e hidráulicas estabelecidas no canal estão representadas na Tabela 1.

$$\text{Rey} = \frac{U \cdot D_H}{\nu} \quad \text{Equação (1)}$$

Em que, Rey é o número de Reynolds (-), U é a velocidade do escoamento (m/s), D_H é o diâmetro hidráulico (m) e ν a viscosidade cinemática da água (m²/s).

Tabela 1: Condições físicas e hidráulicas estabelecidas no canal hidráulico circular.

Experimentos	U (m/s)	Rey (-)	Lâmina d'água (cm)	Volume d'água (L)	Variação da temperatura da água (°C)	Altitude (m)
1 a 11	0,03	5076	15	32,6	27,9 a 28,4	670,6
12 a 22	0,2	47080	15	32,6	24,9 a 25,8	670,6
23 a 33	0,4	72848	12	12	17,9 a 21,8	670,6
34 a 44	0,6	94116	9	9	24,8 a 25,5	670,6

Os experimentos de reaeração superficial seguiram a seguinte ordem: 1. O canal foi abastecido com água da torneira, e a lâmina d'água desejada foi ajustada; 2. O registro foi ajustado, de modo a obter uma velocidade do escoamento, e o trocador de calor foi acionado; 3. Os sensores de OD e temperatura foram instalados; 4. O oxigênio dissolvido foi removido da água por meio da adição de sulfito de sódio (*i.e.*, desoxigenação química); 5. O surfactante foi adicionado, de acordo com a concentração requerida; 6. Foi iniciado o experimento de reaeração superficial e a coleta de dados de concentração de OD.

A concentração de OD e a temperatura foram medidas com um oxímetro digital e um termopar, 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_2 , foram realizados com o uso da técnica da análise de regressão não linear.

$$C_{(t)} = C_s - (C_s - C_0) \cdot e^{-K_2 \cdot t} \quad \text{Equação (2)}$$

Em que, $C_{(t)}$ é a concentração de OD em determinado tempo (mg/L), C_s é concentração de saturação de OD na água (mg/L), C_0 é a concentração inicial de OD (mg/L), K_2 é coeficiente de reaeração superficial (dia⁻¹) e t é o tempo (dia).

A Equação 2 representa o aumento da concentração de OD no meio líquido ocasionado pela transferência de massa de oxigênio através da interface ar-água, se uma condição de desequilíbrio de OD na interface existir. Esta equação foi o resultado de um balanço de massa de oxigênio dissolvido desenvolvido na ausência de sumidouros e considerado como fonte de introdução de OD apenas o fenômeno da reaeração superficial (GUALTIERI *et al.*, 2002).

De acordo com a equação proposta por Pöpel (1979) (Equação 3), C_s foi obtida através da temperatura da água e altitude do local onde foram realizados os experimentos. A altitude foi obtida por meio de um barômetro.

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

Em que, T corresponde à temperatura da água (°C) e Alt a altitude do local (m).

Os valores de K_2 obtidos foram corrigidos para a temperatura padrão de 20°C através da equação de Arrhenius simplificada (Equação 4).

$$K_{2T} = K_{2,20^\circ\text{C}} \cdot \theta^{(T-20)} \quad \text{Equação (4)}$$

Em que, K_{2T} é o coeficiente de reeração obtido em determinada temperatura (dia^{-1}), $K_{2,20^\circ\text{C}}$ é o coeficiente de reeração a 20°C (dia^{-1}), T é a temperatura (°C) e θ o coeficiente de correção da temperatura (-). θ é igual a 1,0241 (CHAPRA, 1997).

O surfactante aniônico utilizado nos experimentos de reeração superficial foi o Dodecil Sulfato de Sódio ($\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{NaO}_4\text{S}$), ultrapuro (Aldrich, 99%). A CMC do surfactante foi determinada por meio do método da condutividade elétrica (MORAES; REZENDE, 2004). Foram atribuídas 11 concentrações distintas de SDS (0 mMol/L; 0,3mMol/L; 0,6 mMol/L; 0,9 mMol/L; 1,2 mMol/L; 1,5 mMol/L; 1,6 mMol/L; 1,7 mMol/L; 2,0 mMol/L; 2,3 mMol/L e 2,6 mMol/L) para todos os níveis de turbulência utilizados nos experimentos de reeração superficial.

A avaliação do efeito do SDS sobre o K_2 foi realizada por meio do fator α (Equação 5). Essa metodologia de avaliação pelo fator α gerou resultados consistentes em pesquisas desenvolvidas por Gillot *et al.* (2000), Rosso e Stenstrom (2006) e Jamnongwong *et al.* (2010).

$$\alpha = \frac{K_{2-\text{Água com SDS}}}{K_{2-\text{Água limpa}}} \quad \text{Equação (5)}$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores das CMC do SDS obtidas para a água pura (Milipore Mili-Q) (Figura 2a) e para a água da torneira (Figura 2b) foram 8,0 mMol/L e 1,58 mMol/L, respectivamente.

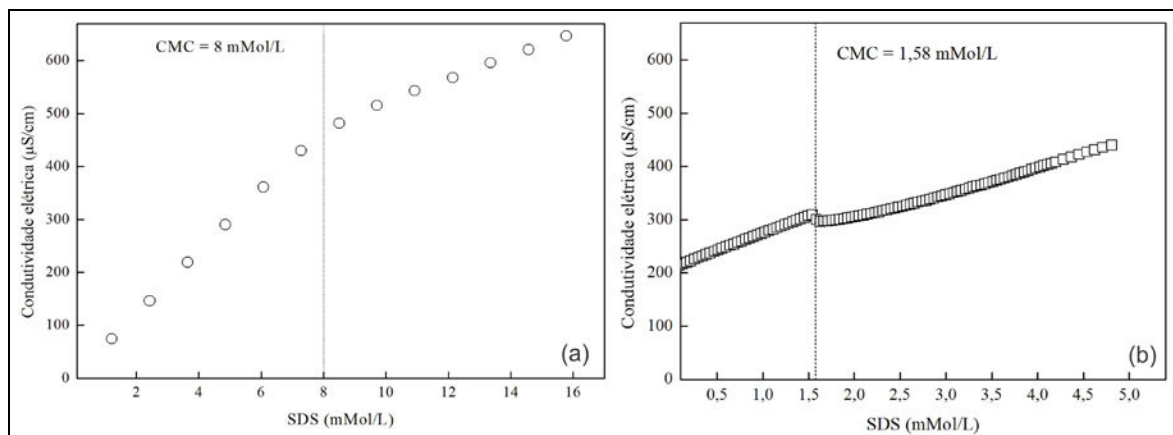


Figura 2: (a) CMC do SDS obtida para a água pura; (b) CMC do SDS obtida para a água utilizada nos experimentos de reeração superficial (água da torneira).

O valor encontrado para a CMC da água pura está em consonância com o valor encontrado por Moraes e Rezende (2004) e Al Soufi *et al.* (2012), sendo igual a 8,0 mMol/L. Esse valor divergiu do obtido para a água da torneira utilizada neste trabalho, variação (redução) de 80% em relação a CMC da água pura.

A força iônica da água utilizada nos experimentos foi bastante diversificada, pois além dos sais minerais inerentes a sua composição natural, há também a adição dos compostos químicos sintéticos nas estações de tratamento de água (*e.g.*, floculantes, bactericidas, corretores de pH, fluossilicato de sódio, ácido fluossilícico, entre outros) e no processo de desoxigenação da água utilizada nos experimentos de reeração superficial (*e.g.*,

sulfito de sódio, sulfato de sódio e demais). Esses compostos químicos dispersos na água alteram a força iônica do meio, pois dissociam em diferentes tipos de íons livres, ou também denominado contra-íons, que interagem no meio aquoso com o SDS e alteram a condutividade elétrica do meio, e conseqüentemente, ocasionam a antecipação da CMC (RIZZATI *et al.*, 2009).

Abaixo da CMC, os monômeros de SDS atuam como fortes eletrólitos, e após a CMC, os monômeros de SDS contribuem para a formação de micelas. Após a formação das micelas, os poucos monômeros livres existentes no meio aquoso resultam em um coeficiente angular menor do que inicial na reta de condutividade elétrica, conforme demonstrado em ambos gráficos da Figura 2 (RIZZATI *et al.*, 2009). Na Figura 2a, para a água pura, não houve a redução da condutividade elétrica no momento em que o meio aquoso atinge a CMC, pois não há íons livres na solução. Na Figura 2b existe uma discreta redução da condutividade elétrica no momento em que ocorre a CMC, esta redução é originada pela menor mobilidade iônica das micelas, e conseqüentemente, menor o contato com o eletrodo que mensura a condutividade elétrica.

Em meio aquoso, o íon Na^+ se dissocia da estrutura do SDS, com isso, a cabeça hidrofílica fica carregada com carga negativa e, conseqüentemente, atrai os íons cátions do meio aquoso (*e.g.*, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , entre outros), em consequência disso, a estrutura do surfactante fica com excesso de cargas positivas e passam a interagir com contra-íons (*e.g.*, Cl^- , OH^- , F^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , SO_3^{2-} , entre outros). As forças eletrostáticas atrativas entre os monômeros do SDS, mediadas e intensificadas pela presença dos contra-íons dissolvidos na água, facilitaram a formação de micelas, por isso, o valor da CMC encontrado foi menor em relação ao da água pura.

Rizzati *et al.* (2009) também relataram em suas pesquisas a influências dos contra-íons sobre o processo de micelização. Para esses autores, durante a formação de micelas, os grupos hidrofílicos (cabeças) do surfactante ficam muito próximos, gerando uma repulsão eletrostática que se opõe ao processo de micelização. Nessa etapa, os contra-íons desempenham um papel fundamental, pois revestem e blindam a carga da estrutura coloidal e diminuem o potencial elétrico provocando atração entre as cabeças dos monômeros, esse processo também facilita a formação de micelas.

Foram gerados 44 coeficientes K_2 , em diferentes turbulências e concentrações de SDS (Tabela 2). Alguns dos ajustes das concentrações de OD, obtidas ao longo do tempo, ao modelo matemático (Equação 2) são apresentados na Figura 3. É possível observar que houve um bom ajuste ($R^2 > 0,9$) do modelo aos dados de OD obtidos. A temperatura média dos experimentos teve uma variação de aproximadamente $\pm 3^\circ\text{C}$.

Tabela 2: K_2 obtidos em diferentes turbulências e concentrações de SDS, corrigidos para a temperatura padrão de 20°C .

SDS (mMol/L)	Reynolds 5076	Reynolds 47080	Reynolds 72848	Reynolds 94116
	K_2 (dia ⁻¹)	K_2 (dia ⁻¹)	K_2 (dia ⁻¹)	K_2 (dia ⁻¹)
0	4,11	8,87	28,90	44,07
0,3	3,76	8,67	26,51	35,44
0,6	4,36	9,34	22,94	43,24
0,9	4,03	9,52	25,11	37,95
1,2	3,89	9,57	29,78	44,41
1,5	3,5	10,15	23,81	39,69
1,6	4,74	8,97	21,64	47,03
1,7	4,5	8,71	22,43	42,45
2,0	5,48	9,3	23,64	44,23
2,3	5,72	9,62	21,08	46,69
2,6	4,94	9,04	29,16	46,77

Os valores de K_2 variaram de $3,5 \text{ dia}^{-1}$ (experimento 6) para menores turbulências (*i.e.*, Reynolds 5076) a $46,8 \text{ dia}^{-1}$ (experimento 44) para elevadas turbulências (*i.e.*, Reynolds 94116). 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 à maiores turbulências que ocorrem na interface ar-água.

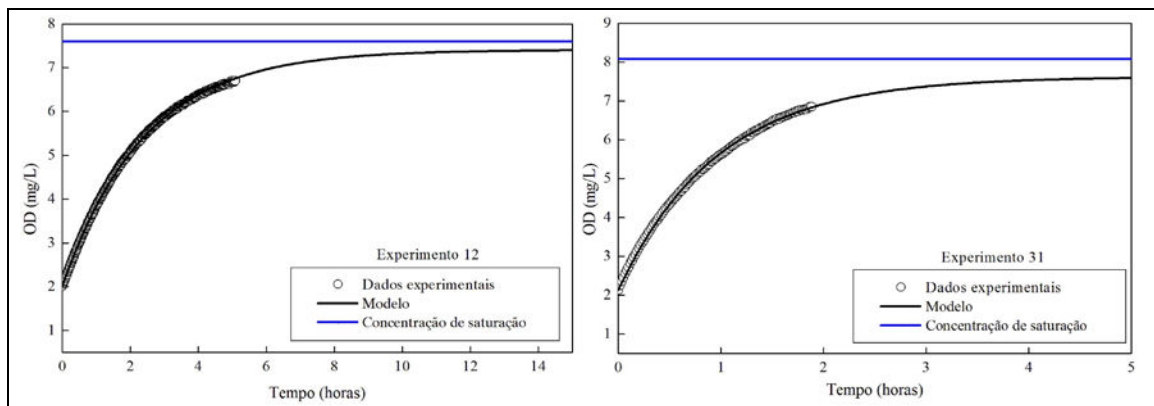


Figura 3: Experimentos de reaeração superficial: Experimento 12 corresponde a 0 mMol/L de SDS; Experimento 31 corresponde a 2 mMol/L de SDS.

A influência do SDS sobre o K_2 (Figura 4) apresentou variações máximas ($\alpha = 1,2$) e mínimas ($\alpha = 0,8$). Foi verificada uma pequena redução (10%) do valor de K_2 na região da CMC para todos os níveis de turbulência. Resultados semelhantes a essa redução do K_2 na zona da CMC também foram obtidos por Rosso *et al.* (2006), que realizaram experimentos de reaeração superficial por ar difuso, e obtiveram uma redução do K_2 de aproximadamente 30 a 70% para a água pura.

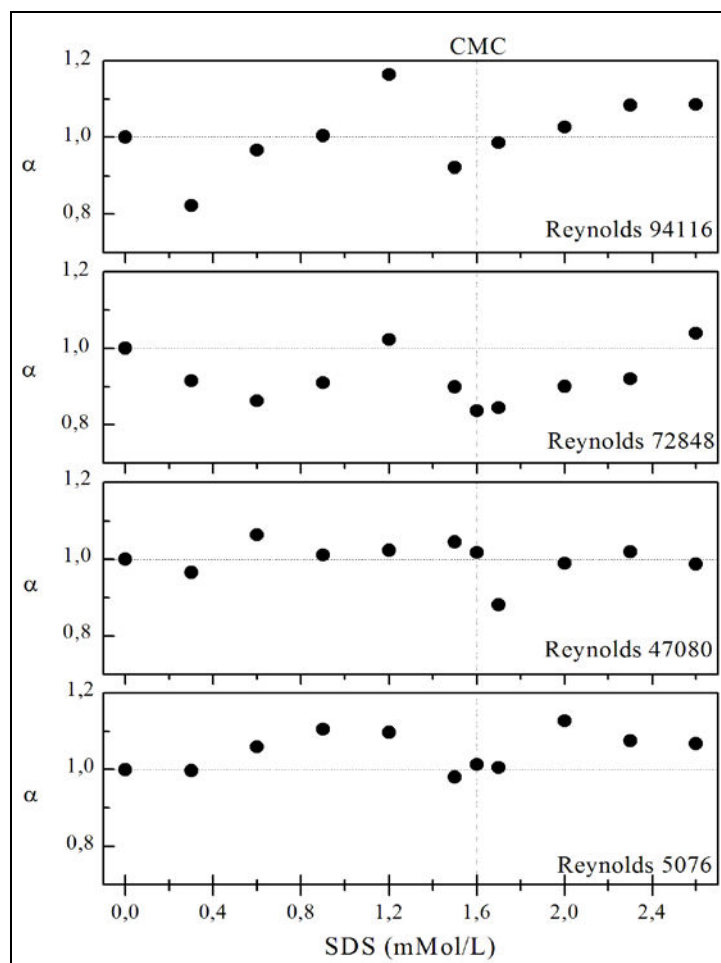


Figura 4: Influência do SDS sobre o fenômeno da reaeração superficial.

Rosso e Stenstrom (2006) apresentaram valores de α obtidos em diferentes estruturas de turbulência (ar difuso, aerador superficial e aerador tipo turbina) e relacionaram os diferentes tipos de regimes de fluxos (transporte

por difusão e transporte por advecção). Os autores concluíram que as estruturas de aerador superficial e tipo turbina apresentaram valores de α de 0,75 a 1,1. Estes resultados se assemelham aos obtidos por Gillot *et al.* (2000), que utilizaram um aerador por ar difuso em um tanque retangular, obtiveram valores de α variando de 1,08 a 0,97.

Sistemas de reaeração por ar difuso apresentaram-se mais eficazes do que o canal hidráulico circular em relação à redução do K_2 , resultados de diversas pesquisas indicaram que K_2 atinge uma redução de aproximadamente 30 a 70% (ROSSO *et al.*, 2006; JAMNONGWONG *et al.*, 2010). Entretanto, pesquisas que avaliaram o efeito do SDS sobre o K_2 em um sistema de turbulência composto por um canal hidráulico circular são pouco realizadas. Neste trabalho, a ação do surfactante sobre o K_2 apresentou-se mascarado por outros efeitos, tais como: contra-íons, Marangoni e filme superficial.

Na região da CMC, a redução do K_2 pode estar relacionada à formação de um filme superficial na interface ar-água, esse filme é composto por uma monocamada de surfactante que reduz a área superficial e dificulta a transferência de oxigênio para o meio líquido, na interface ar-água.

Nas regiões antecedentes e sucedentes a CMC, o aumento do K_2 pode ser atribuído ao efeito de Marangoni. Esse efeito é obtido por meio de um gradiente de concentração do SDS. Esse gradiente resulta na redução da tensão superficial da água, que ocorre devido às diferentes concentrações do surfactante que se formam ao longo da lâmina da solução aquosa. A diferença de concentrações de SDS ao longo da lâmina d'água resulta em movimentos convectivos do SDS, que por sua vez, renova a superfície aumentando a transferência de oxigênio na interface ar-água (ZHANG *et al.*, 2013).

CONCLUSÕES

O canal hidráulico circular construído mostrou-se ser um sistema hidrodinâmico de geração de turbulência eficiente para executar o presente estudo.

A CMC obtida situou-se na faixa de 1,58 mMol/l para a água da torneira utilizada nos experimentos, essa antecipação ocorreu devido à presença de contra-íons dissolvidos na água que alterou a força iônica da solução.

O efeito do surfactante SDS sobre o K_2 foi dinâmico, e depende do nível de turbulência, da estrutura geradora da turbulência, estrutura química (tipo) e concentração do surfactante e também da composição química da água. Essa dinâmica é representada por diversos efeitos que aumentam ou reduzem o K_2 .

Contudo, mais pesquisas ainda são necessárias para compreender individualmente cada efeito atuante sobre o fenômeno da reaeração superficial, além da necessidade de avaliar diferentes tipos de surfactantes (aniônicos e catiônicos) em diferentes concentrações, e também em corpos d'água naturais.

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 Minas Gerais (FAPEMIG), ao trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AL SOUFI, W.; PINEIRO, L; NOVO, M.A. A model for monomer and micellar concentrations in surfactant solutions: Application to conductivity, NMR, diffusion, and surface tension data. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.370, n.1, p.102-110, 2012.
2. CHAPRA, S.C. *Surface water-quality modeling*. McGraw-Hill. 844p. 1997.
3. GILLOT, S.; CAPELA, S.; HEDUIT, A.A. effect of horizontal flow on oxygen transfer in clean water and clean water with surfactants. *Water Research*, v.34, n.2, p.678-683, 2000.

4. GUALTIERI, C.; GUALTIERI, P.; DORIA, G.P. Dimensional analysis of reaeration rate in streams. *Journal of Environmental Engineering*, v.128, n.1, p.12-18, 2002.
5. JAMNONGWONG, M.; LOUBIERE, K.; DIETRICH, N.; HÉBRARD, G. 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, p.758-768, 2010.
6. MORAES, S.L.; REZENDE, M.O.O. Determinação da concentração micelar crítica de ácidos húmicos por medidas de condutividade e espectroscopia. *Química Nova*, v.27, n.5, p.701-705, 2004.
7. MORAVEJI, M.K.; PASAND, M.M.; DAVARNEJAD, R.; CHISTI, Y. 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, 2011.
8. MCKENNA, S.P.; MCGILLIS, W.R. The role of free-surface turbulence and surfactants in air-water gas transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v.47, p.539-553, 2004.
9. PÖPEL, H.J. *Aeration and gas transfer*. 2 ed. Delf University of Technology. 169 p. 1979.
10. QUEIROZ, F.M.; MATOS, A.T.; von SPERLING, M. Estimativa do coeficiente de reeração da água em canal raso de fundo deslizante. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.20, n.1, p.79-78, 2015.
11. RIZZATI, I.M.; ZANETTE, D.R.; MELLO, L.C. Determinação potenciométrica da concentração micelar crítica de surfactants: Uma nova aplicação metodológica no ensino de química. *Química Nova*, v.32, n.2, p.518-521, 2009.
12. ROSSO, D.; HUO, D.L.; STENSTROM, M.K. Effect of surfactant contamination on bubble gas transfer. *Chemical Engineering Science*, v.61, p.5500-5514, 2006.
13. ROSSO, D.; STENSTROM, M. K. Surfactant effects on α -factors in aeration systems. *Water Research*, v.40, n.7, p.1397-1404, 2006.
14. ZHANG, S.; WANG, D.; BU, F.; ZHANG, X.; FAN, P. 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, 2013.