

III - 945 - REMOÇÃO DE ALQUILBENZENO LINEAR SULFONATO (LAS) EM CONDIÇÕES ANAERÓBIAS E MICROAERÓBIAS

Maurício Guimarães de Oliveira

Engenheiro Ambiental e Sanitarista pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Mestre em Engenharia Civil/Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Doutorando em Engenharia Civil/Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

José Marcos Marques Mourão

Engenheiro Ambiental e Sanitarista pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Mestre em Engenharia Civil/Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Doutorando em Engenharia Civil/Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Tiago Rocha Nogueira

Bacharel em Química Industrial pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Mestrando em Química pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Paulo Igor Milen Firmino

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). PhD em Engenharia Civil/Saneamento Ambiental. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC.

André Bezerra dos Santos⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). PhD em Environmental Sciences pela Wageningen University, Holanda. Professor Titular do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC.

Endereço⁽¹⁾: R. Prof. Armando Farias, 713, Pici – Fortaleza, Ceará, Brasil – CEP: 60.440-900 – E-mail: andre23@ufc.br

RESUMO

A presente pesquisa buscou avaliar a remoção/biotransformação de alquilbenzeno linear sulfonato (LAS) em reator UASB operado em condições anaeróbias tradicionais e microaeróbias. O tempo de retenção hidráulica (TDH) utilizado nos dois reatores foi de 8 h, sendo que o reator 1 (R1) funcionava como um reator UASB tradicional e o reator 2 (R2) foi microaerado com ar sintético em sua base por meio de um controlador de fluxo mássico. A dose de ar da microaeração utilizada em R2 foi de aproximadamente $3,5 \text{ L}_{\text{ar}} \cdot \text{min}^{-1}$, correspondendo a $0,1 \text{ L}_{\text{O}_2} \cdot \text{L}_{\text{alimentação}}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. O reator microaeróbio (R2) apresentou maiores remoções de matéria orgânica total e estabilidade operacional do que o reator anaeróbio (R1), atingindo $91,3 \pm 2,7 \%$ de remoção de DQO. Observa-se também que o R2 reator microaeróbio obteve uma maior remoção de LAS durante a quase totalidade do experimento, com valores médios de $42,9 \pm 8,1\%$, contra $32,6 \pm 16,3\%$ no reator UASB controle. Foi possível observar que a presença de LAS, na concentração utilizada, não teve efeito tóxico na biomassa dos reatores, não interferindo no processo de remoção da matéria orgânica e produção de metano. A microaeração acarretou em maior remoção de matéria orgânica, produção de biogás e maior remoção de LAS. No entanto, o biogás proveniente do R2 tinha um menor teor de metano advindo da diluição com o ar da microaeração. A remoção do LAS foi decorrente de processos biológicos, com pouca influência de processos adsorptivos. O processo microaeróbio foi possivelmente impactado negativamente pela influência do LAS na taxa de transferência de oxigênio da microaeração para o meio líquido, resultando em valores de eficiência de remoção de LAS menores do que inicialmente pensado. Portanto, é necessário estudos futuros com diferentes doses de microaeração, análise de quantificação de LAS no lodo e análise microbiológica da biomassa para uma melhor compreensão das principais rotas de remoção deste surfactante em sistemas anaeróbios e microaeróbios.

PALAVRAS-CHAVE: Microaeração; Digestão Anaeróbia; LAS; Surfactantes.

INTRODUÇÃO

Surfactantes estão frequentemente presentes em esgotos sanitários e industriais, efluentes de lavanderias, lava-jatos, entre outros. Dentre os surfactantes, o alquilbenzeno linear sulfonato (LAS - linear alkylbenzene sulfonate) é o principal tensoativo utilizado pelos fabricantes de produtos de limpeza, devido a sua excelente propriedade detergente e o seu baixo custo (VYMAZAL, 2014). A concentração de LAS encontrada em efluentes sanitários tem sido relatada entre 2 e 21 mg.l⁻¹, enquanto que em águas residuais provenientes de lavanderias comerciais, sua concentração reportada é de 17 a 1024 mg.l⁻¹ (ASKARI et al., 2021).

Os surfactantes e/ou PPE merecem atenção especial, pois, embora existam diversas tecnologias disponíveis para o tratamento de efluentes, muitos processos biológicos ainda são ineficientes, resultando no descarte de vários compostos nos corpos receptores, e representando um risco ambiental e de saúde pública (COSTA et al., 2020).

A remoção do LAS pode ocorrer de diversas formas, como biodegradação, precipitação e adsorção. A remoção do LAS por processos aeróbios de tratamento de esgoto foi relatada em vários estudos (KIM et al., 2019; CUI et al., 2022). No entanto, são processos de elevado custo de implantação, operação e manutenção, muitas vezes incompatíveis com a capacidade de pagamento de países em desenvolvimento, como o Brasil.

Por outro lado, tecnologias anaeróbias de tratamento de esgoto, como os reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB), têm sido amplamente utilizadas em países desenvolvidos e em desenvolvimento, tanto para o tratamento de efluentes domésticos quanto industriais. Essa ampla aplicação pode ser atribuída à eficiência satisfatória de remoção de matéria orgânica, simplicidade operacional, baixo custo de implantação, operação e manutenção, baixa produção de lodo, além da produção de metano (CH₄), que pode ser utilizado como fonte de energia (calor e eletricidade) (SOUZA et al., 2016). No entanto, existem algumas considerações sobre a remoção de LAS em reatores UASB, por exemplo, a necessidade de adoção de tempos de detenção hidráulica (TDH) relativamente longos, 12 a 24 horas comumente, podendo chegar até 48 horas, especialmente atribuída à recalcitrância deste composto químico (OKADA et al., 2012). Esse elevado TDH é incompatível com o projeto de reatores UASB em países de clima quente como o Brasil para o tratamento de esgoto sanitário, onde são adotados TDHs da ordem de 6 a 8h com base na vazão média afluente. Além disso, as bactérias e arqueias podem sofrer toxicidade do LAS, a depender da concentração deste na água residuária.

Estudos observaram que a biodegradação de compostos surfactantes pode aumentar com a adição de fontes de carbono prontamente degradáveis como etanol e sacarose, dependendo da comunidade microbiana envolvida na degradação do composto químico. Co-substratos como álcoois alifáticos, aldeídos e ácidos carboxílicos como acetato e lactato são importantes mecanismos de reativação da atividade microbiana (MOTTERAN et al., 2018). Okada et al., (2013) analisaram os efeitos do TDH, biodisponibilidade de LAS e adição de co-substrato na degradação de LAS em reatores UASB alimentados com efluente sintético. Os resultados mostraram que a maior taxa de degradação do LAS (76%) estava relacionada à menor taxa de carga orgânica específica (0,03 gCOD·gSTV⁻¹·d⁻¹ – DQO afluente de 57 ± 4 mg·L⁻¹ e TDH de 35 horas), valores de concentração bem inferiores aos encontrados em estações de tratamento de esgotos sanitários.

Portanto, torna-se necessário o desenvolvimento de estudos que aumentem as eficiências de remoção de LAS em reatores UASB, especialmente para serem projetados com baixo TDH, que resultará em menores volumes de reatores e menores custos. Nesse contexto, estudos mostram que a adição de baixas concentrações de oxigênio (microaeração) em reatores UASB melhoraram a remoção de compostos recalcitrantes, como hidrocarbonetos monoaromáticos (BTEX) (SIQUEIRA et al., 2018), fármacos (BUARQUE et al., 2021), hormônios (NASCIMENTO et al., 2021), além de ser uma excelente estratégia de remoção de sulfeto de hidrogênio do biogás (BRITO, 2020). As fontes de oxigênio são geralmente ar atmosférico ou oxigênio puro, com doses variando de 0,005 a 5 LO₂·L_{alim.}⁻¹·d⁻¹, dependendo da finalidade do tratamento e composição do substrato (NGUYEN & KHANAL, 2018).

A presente pesquisa buscou avaliar a remoção/biotransformação de LAS em reator UASB operado em condições anaeróbias tradicionais e microaeróbias. Até onde se sabe, nenhum estudo publicado até o presente avaliou o processo microaeróbio na remoção de LAS.

MATERIAIS E MÉTODOS

O efluente sintético foi preparado dissolvendo em água potável uma mistura de alquilbenzeno linear sulfonato (LAS - *linear alkylbenzene sulfonate*) (Sigma-Aldrich, EUA) ($5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), sacarose (99,8%, Dynamics, Brasil) como co-substrato ($1 \text{ g DQO} \cdot \text{L}^{-1}$), macro e micronutrientes (FIRMINO et al., 2010) e bicarbonato de sódio ($1 \text{ g DQO} \cdot \text{L}^{-1}$) como tampão para manter o pH próximo a 7,0.

Os reatores possuíam um volume útil de 3,25 L, mantido em temperatura ambiente, e cujas vazões de alimentação foram ajustadas por duas bombas peristálticas (ColeParmer MasterFlex L/S 7522-30, EUA), para a operação com um TDH de 8 h, próximo a valores de projeto de reatores UASB tratamento esgoto sanitário.

O reator 1 (R1) funcionou como um reator UASB tradicional. O reator 2 (R2) foi construído com as mesmas dimensões e material do R1, mas foi microaerado com ar sintético (80% N_2 :20% O_2 , White Martins, Brasil) em sua base por meio de um controlador de fluxo de massa (GFC17, Cole-Parmer, EUA). A dose de ar da microaeração utilizada em R2 foi de aproximadamente $3,5 \text{ L}_{\text{ar}} \cdot \text{min}^{-1}$, correspondendo a $0,1 \text{ L}_{\text{O}_2} \cdot \text{L}_{\text{alimentação}}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. Ambos os reatores foram inoculados com 1,6 L de lodo anaeróbio coletado em um reator UASB de uma estação de tratamento de esgoto em escala plena, representando cerca de 50% do volume útil de cada reator. As concentrações de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis totais (SVT) no lodo de inóculo foram $68,2 \pm 2,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ e $36,7 \pm 1,4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectivamente.

DQO, pH, sólidos totais (ST), sólidos suspensos totais (SST), sólidos dissolvidos totais (SDT), PO_4^{3-} , SO_4^{2-} foram determinados pela APHA (2012). A alcalinidade total (AT) foi determinada pelo método titrimétrico de Kapp (Buchauer, 1998). A quantificação de CH_4 , N_2 , CO_2 , H_2 e H_2S no biogás foi determinada por cromatografia gasosa com detecção de ionização por descarga de barreira dielétrica (GC BID-2010 Plus, Shimadzu Corporation, Japão), equipada com coluna GS-GASPRO ($60 \text{ m} \times 0,32 \text{ mm}$) (Agilent Technologies Inc., EUA). O gás hélio foi usado como gás de arraste (White Martins LTDA, Brasil) a uma vazão de $2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, com tempo de corrida de 9 min. As temperaturas do forno, injetor e detector foram de 50, 100 e 250 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores dos parâmetros operacionais pH, AT, PO_4^{3-} e SO_4^{2-} dos reatores anaeróbio (UASB) e microaeróbio (UMSB) são apresentados na Tabela 1, observando-se desempenhos bastante parecidos.

Tabela 1 – Parâmetros operacionais obtidos na operação dos reatores anaeróbio (R1) e microaeróbio (R2).

	ST ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SST ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH	AT ($\text{mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$)	PO_4^{3-} ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SO_4^{2-} ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
Afluente	-	-	$7,1 \pm 0,4$	517 ± 72	$25,3 \pm 4,4$	$38,6 \pm 5,4$
R1 (controle)	1397 ± 241	70 ± 67	$7,4 \pm 0,1$	549 ± 50	$27,5 \pm 5,4$	$37,0 \pm 7,2$
R2	1378 ± 261	46 ± 59	$7,4 \pm 0,2$	561 ± 78	$29,8 \pm 3,3$	$36,0 \pm 5,2$

A relação média de SST/ST na saída de ambos os reatores foi menor ou igual a 5%, o que indica pouca perda de biomassa ao longo do experimento. O pH do efluente dos dois reatores permaneceu próximo à neutralidade, demonstrando a boa estabilidade operacional dos sistemas. Em decorrência de processos anaeróbios com alta eficiência, como no presente experimento, houve uma manutenção do AT, que é importante para a estabilidade operacional de sistemas anaeróbios.

Durante a DA, SO_4^{2-} pode ser reduzido a sulfeto via redução de sulfato. O sulfeto pode ficar na forma dissolvida (S^{2-}) ou gasosa (H_2S), dependendo do pH, pressão dentro do reator, temperatura, entre outros. A redução de sulfato é um processo competitivo de metanogênese (LI et al., 2019). A análise do biogás não mostrou H_2S e S^{2-} não foi detectado no efluente dos reatores, além de não haver diferença na concentração média de sulfato na entrada e saída dos reatores.

Entretanto, em termos de remoção de DQO, o reator microaeróbio R2 teve desempenho superior ao R1 desde o início do experimento, alcançando valores médios de $85,8 \pm 3,6 \%$ e $91,3 \pm 2,7 \%$ para os reatores R1 e R2, respectivamente. Observou-se também que em ambos os reatores houve uma tendência de aumento da remoção de DQO ao longo do tempo.

Houve pouca variação na remoção de matéria orgânica ao longo do experimento em ambos os reatores, o que também corrobora para a inexistência de toxicidade do LAS sobre a biomassa. A presença de sacarose como co-substrato, por ser um substrato altamente biodegradável, também foi de fundamental importância para a alta remoção de DQO. Motteran et al. (2018) observaram um aumento da eficiência de remoção de matéria orgânica com a adição de co-substratos, como etanol, uma vez que esses compostos atuam no co-metabolismo, auxiliando na remoção do LAS e matéria orgânica.

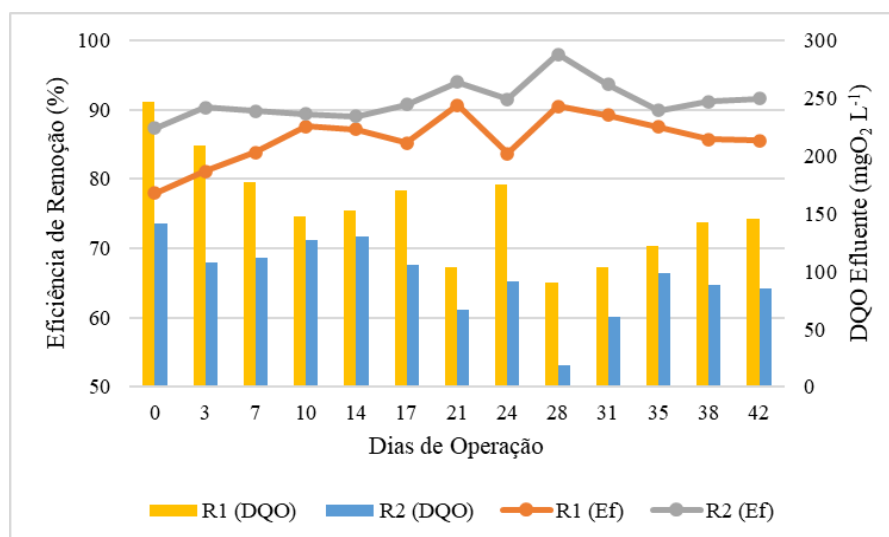


Figura 1: Eficiência de remoção de DQO dos reatores anaeróbico (R1) e microaeróbico (R2).

A Figura 2 mostra a produção e composição volumétrica de biogás obtida nos reatores UASB (Figura 2a) e UMSB (Figura 2b). É possível observar, em ambos os reatores, um aumento na produção volumétrica de biogás a partir do 21º dia de operação. Com base no monitoramento do reator UASB (Figura 2a), é possível afirmar que durante a etapa de estabilização, o R1 teve uma produção média diária de $2,7 \pm 0,7 \text{ L} \cdot \text{dia}^{-1}$, com concentração média de metano de $76,5 \pm 0,1 \%$, a uma taxa média de produção de $0,2 \pm 0,1 \text{ LCH}_4 \cdot \text{gDQO}_{\text{ap}}^{-1}$. Já o R2 produziu, em média, $2,9 \pm 0,9 \text{ L} \cdot \text{dia}^{-1}$, com concentração média de metano de $40,0 \pm 0,0 \%$, a uma taxa média de produção de $0,1 \pm 0,0 \text{ LCH}_4 \cdot \text{gDQO}_{\text{ap}}^{-1}$, e uma elevada concentração de N_2 no biogás. Esta baixa concentração de metano pode acontecer devido a diluição do biogás pela injeção de ar para a microaeração, como também foi observado no experimento de Oliveira et al. (2021).

As eficiências de remoção de LAS nos reatores anaeróbico (R1) e microaeróbico (R2) são apresentadas na Figura 3. Verifica-se que ambos os reatores atingiram uma estabilidade na remoção de LAS a partir do 21º dia, após uma queda abrupta na remoção do composto desde o início de operação do sistema. Observa-se também que o reator microaeróbico R2 obteve uma maior remoção de LAS durante a quase totalidade do experimento, com valores médios de $42,9 \pm 8,1\%$, contra $32,6 \pm 16,3\%$ no reator UASB controle (R1).

Motteran et al. (2018) ao estudarem em um reator de leito fluidizado (TDH de 16 h) as rotas metabólicas envolvidas na degradação anaeróbia de LAS ($7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) obtiveram uma remoção média de LAS de $44,3\%$. Já Okada et al. (2013) ao operarem um reator UASB com TDH de 6 h e com LAS na concentração de $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ obtiveram uma remoção média de 25% .

O reator de microaeróbico teve uma remoção aproximadamente 30% maior que o reator UASB. Estudos com reatores microaeróbicos demonstraram que adição de pequenas quantidades de ar auxiliam na remoção de compostos recalcitrantes (NASCIMENTO et al., 2021). No entanto, a remoção de LAS pode acontecer através de precipitação, adsorção e remoção biológica. Para a biodegradação de compostos sulfonados, como o LAS, as bactérias redutoras de sulfato (SRB) desempenham um papel extremamente importante, pois o estado de oxidação desse elemento pode variar muito (-2 a +6).

Segundo o Motteran et al. (2018), a biodegradação anaeróbia de LAS, em grande parte a partir de processos co-metabólicos, tem como consequência a liberação de grupos sulfatos. Como observado, não houve aumento

na concentração de sulfato na saída dos reatores, o que pode indicar que tais grupos liberados podem ter sido utilizados no processo de redução de sulfato da DA. Acredita-se que processos adsorptivos tiveram pouca influência nas remoções encontradas, pela diminuição da eficiência de remoção de LAS até o 21º dia de operação dos sistemas (Figura 3).

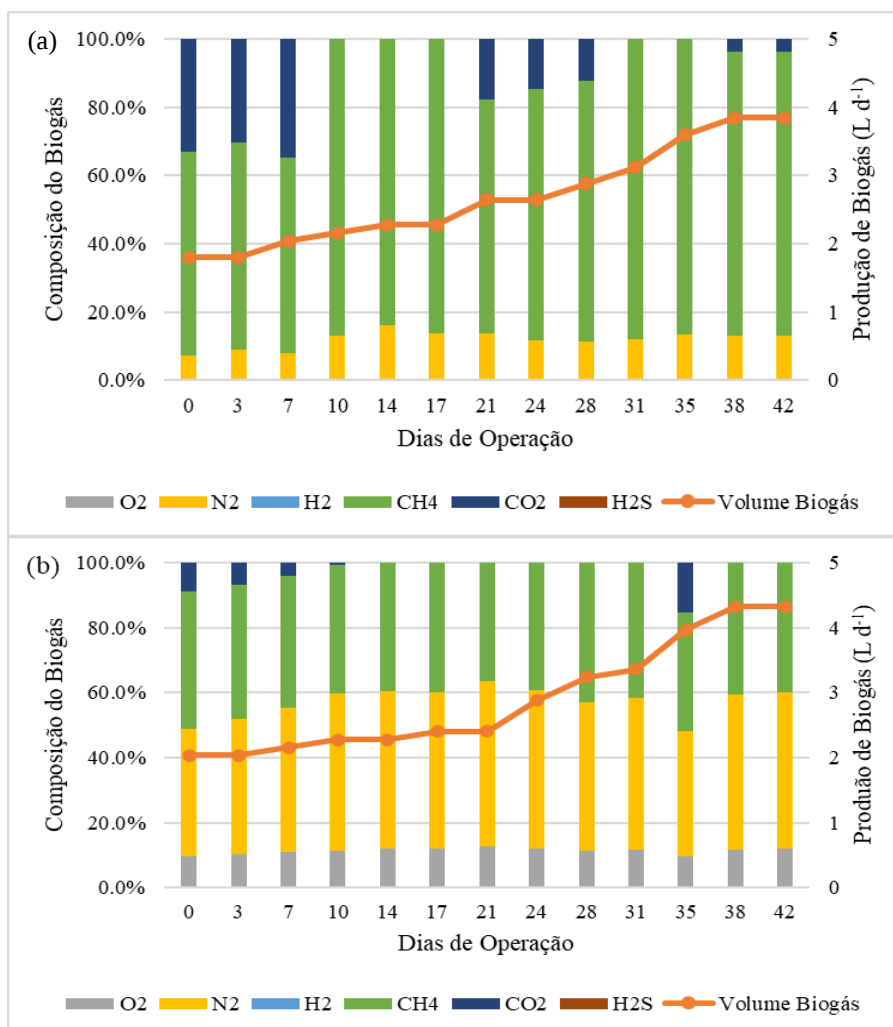


Figura 2: Composição e produção volumétrica de biogás nos reatores anaeróbio (a) e microaeróbio (b).

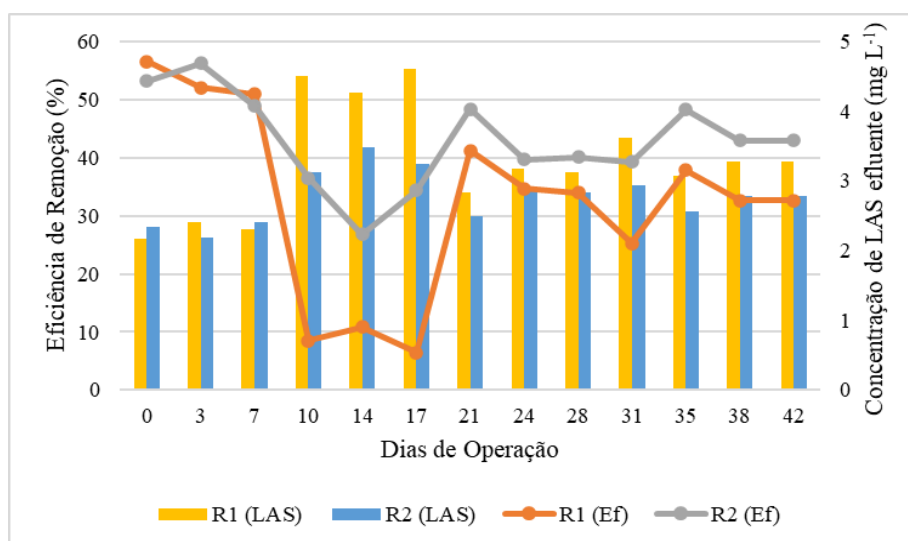


Figura 3: Eficiência de remoção de LAS e concentração de LAS na saída dos reatores anaeróbico (R1) e microaeróbico (R2).

Contudo, devido ao efeito negativo que tensoativos exercem na solubilização de gases para o meio líquido, possivelmente houve impacto negativo na disponibilidade de oxigênio para o processo microaeróbico. Tal fato, resultou em um efeito menos evidente da microaeração nas eficiências de remoção de LAS, muito embora a sua estrutura molecular seja muito menos complexa do que outros poluentes investigados com processos microaeróbios como BTEX, fármacos como a trimetoprima e sulfametoxazol, hormônios como a estrona e estradiol, e produtos de higiene pessoal como os parabenos.

CONCLUSÕES

Foi possível observar que a presença de LAS, na concentração utilizada, não teve efeito tóxico na biomassa dos reatores, não interferindo no processo de remoção da matéria orgânica e produção de metano.

A microaeração acarretou em maior remoção de matéria orgânica, produção de biogás e maior remoção de LAS. No entanto, o biogás proveniente do R2 tinha um menor teor de metano advindo da diluição com o ar da microaeração.

A remoção do LAS foi decorrente de processos biológicos, com pouca influência de processos adsortivos.

O processo microaeróbico foi possivelmente impactado negativamente pela influência do LAS na taxa de transferência de oxigênio da microaeração para o meio líquido, resultando em valores de eficiência de remoção de LAS menores do que inicialmente pensado.

Portanto, é necessária a realização de estudos futuros com diferentes doses de microaeração, análise de quantificação de LAS no lodo e análise microbiológica da biomassa para uma melhor compreensão das principais rotas de remoção deste surfactante em sistemas anaeróbios e microaeróbios.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA (American Public Health Association), 2012. American water works association, water environment federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22th ed.

- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association and Water Environment Federation, Washington, DC.
2. ASKARI, Anis; VAHABZADEH, Farzaneh; MARDANPOUR, Mohammad Mahdi. Quantitative determination of linear alkylbenzene sulfonate (LAS) concentration and simultaneous power generation in a microbial fuelcell-based biosensor. *Journal of Cleaner Production*, v. 294, p. 126349, 2020.
 3. BUCHAUER, K. A comparison of two simple titration procedures to determine volatile fatty acids in influents to wastewater and sludge treatment processes. *Water S A*, 24, 49–56, 1998.
 4. BRITO, Jéssyca de Freitas Lima. Remoção de Sulfeto Em Sistemas Anaeróbios de Tratamento de Esgotos por Desnitrificação Autotrófica Associada à Microaeração. 2020. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.
 5. BUARQUE, Patrícia Marques Carneiro et al. Enhanced removal of emerging micropollutants by applying Microaeration to an anaerobic reactor. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, n. 4, p. 667–673, 2019.
 6. COSTA, Mayara Franco; OLIVEIRA, Ana Maria de; OLIVEIRA JUNIOR; Enio Nazaré de. Biodegradation of linear alkylbenzene sulfonate (LAS) by *Penicillium chrysogenum*. *Bioresource Technology Reports*, v. 9, p. 100363, 2019.
 7. CUI, Xiaocai; REN, Qingqing; ZHANG, Jie; ZHOU, Yun. Removal kinetics of linear alkylbenzene sulfonate in a batch-operated oxygen-based membrane biofilm reactor treating greywater: Quantitative differentiation of adsorption and biodegradation. *Science of the Total Environment*, v. 806, p. 150523, 2022.
 8. FIRMINO, Paulo Igor Melin; SILVA, M. E. R.; CERVANTES, F. J.; DOS SANTOS, André Bezerra. Colour removal of dyes from synthetic and real textile wastewaters in one- and two-stage anaerobic systems. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 20, p. 7773–7779, 2010.
 9. FIRMINO, Paulo Igor Melin; FARIAS, R.S.; BARROS, A.N.; Landim, P. G. C.; HOLANDA, G. B. M.; Rodríguez, E.; Lopes, A. C.; DOS SANTOS, André Bezerra. Applicability of microaerobic technology to enhance BTEX removal from contaminated waters. *Appl. Biochem. Biotechnol*, v. 184, p. 1187–1199, 2018.
 10. KIM, Na-Kyung; LEE, Sang-Hoon; YOON, Hyeokjun; JEONG, Garam; JUNG, You-Jung; HUR, Moonsuk; LEE, Byoung-Hee; Park, Hee-Deung. Microbiome degrading linear alkylbenzene sulfonate in activated sludge. *Journal of Hazardous Materials*, v. 418, p. 126365, 2021.
 11. LI, Y.; CHEN, Y.; WU, J. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: a review. *Appl. Energy*, v. 240, p. 120–137, 2019.
 12. MOTTERAN, Fabricio et al. Metabolic routes involved in the removal of linear alkylbenzene sulfonate (LAS) employing linear alcohol ethoxylated and ethanol as co-substrates in enlarged scale fluidized bed reactor. *Science of the Total Environment*, v. 640–641, p. 1411–1423, 2018.
 13. NASCIMENTO, José Gilmar da Silva do; ARAÚJO, Maria Helena Peres de, SANTOS, André Bezerra dos; SILVA, Marcos Erick Rodrigues da; FIRMINO, Paulo Igor Milen. Can microaeration boost the biotransformation of parabens in high-rate anaerobic systems? *Process Safety and Environmental Protection*, v. 145, p. 255–261, 2021.
 14. NGUYEN, Duc; KHANAL, Samir Kumar. A little breath of fresh air into an anaerobic system: How microaeration facilitates anaerobic digestion process. *Biotechnology Advances*, v. 36, n. 7, p. 1971–1983, 2018.
 15. OKADA, Dagoberto Y. et al. Optimization of linear alkylbenzene sulfonate (LAS) degradation in UASB reactors by varying bioavailability of LAS, hydraulic retention time and specific organic load rate. *Bioresource Technology*, v. 128, p. 125–133, 26 out 2012.
 16. OLIVEIRA, Maurício Guimarães de; MOURÃO, José Marcos Marques; SILVA, Francisco Schiavon Souza; SANTOS, André Bezerra dos; PEREIRA, Erlon Lopes. Effect of microaerophilic treatment on swine wastewater (SWW) treatment: Engineering and microbiological aspects. *Journal of Environmental Management*, v. 299, 1 dez. 2021. li
 17. SIQUEIRA, João Paulo S. et al. Process bioengineering applied to BTEX degradation in microaerobic treatment systems. *Journal of Environmental Management*, v. 223, n. June, p. 426–432, 2018.
 18. SOUZA, Luiza F. C.; FLORENCIO, Lourdinha; GAVAZZA, Savia; KATO, Mario T. Methanogenic activity inhibition by increasing the linear alkylbenzene sulfonate (LAS) concentration. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 51:8, 656–660, 18 abr 2016.

19. VYMAZAL, Jan. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. Ecological Engineering, v. 73, p 724-751, 17 out. 2014.