

II-113 - AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE Ca^{2+} NO ÍNDICE VOLUMÉTRICO DE LODO (IVL) EM SISTEMAS DE LODO ATIVADO EM BATELADA SEQUENCIAL COM OBJETIVO DE GRANULAÇÃO

André Bezerra dos Santos⁽¹⁾

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

Antônio Ricardo Mendes Barros

Tecnólogo em Saneamento Ambiental pelo Instituto Federal do Ceará – *Campus* Limoeiro do Norte (IFCE/LN). Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Doutorando em Engenharia Civil – Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Ian Holanda Herbster Moura

Graduando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Lorayne Queiroz de Oliveira

Graduanda em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Paulo Igor Milen Firmino

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

Endereço⁽¹⁾: Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, *Campus* do Pici, Bloco 713, Pici – Fortaleza – CE - CEP: 60455-900 - Brasil - e-mail: andre23@ufc.br

RESUMO

Dois reatores em batelada sequencial foram operados para verificar a influência do íon Ca^{2+} no processo de granulação aeróbia, utilizando o regime operacional de alimentação/descarte simultâneos, sendo avaliadas as características de sedimentabilidade do lodo a partir do Índice Volumétrico de Lodo (IVL) e a eficiência de remoção de carbono, nitrogênio e fósforo. A diferença entre os sistemas foi a adição de 100 mg Ca^{2+} /L na forma de cloreto de cálcio no segundo reator. Os reatores foram operados ao longo de três etapas, as quais diferiram quanto ao tempo de sedimentação do ciclo (30, 20 e 10 min). Em termos de sedimentabilidade, o lodo com presença do íon apresentou valores de IVL cerca de duas vezes menores que os do outro sistema. Entretanto, não foram encontradas diferenças marcantes na remoção de carbono (> 95%), nitrogênio (nitrificação > 90% e desnitrificação entre 38% e 56%) e fósforo (43%).

PALAVRAS-CHAVE: IVL, lodo granular aeróbio, RBS, lodo ativado.

INTRODUÇÃO

O processo de granulação de lodo está relacionado a interações de células, que são influenciadas por fatores físicos, químicos e biológicos, os quais são aplicados à biomassa anaeróbia e aeróbia. Os grânulos formados nesse processo são agregados microbianos esféricos e densos com a formação de associações multicelulares bastante estáveis e contíguas, consistindo em um caso especial de biofilme sem a presença de material suporte (BASSIN, 2012; ADAV, 2009; LIU e TAY, 2004).

A definição de Lodo Granular Aeróbio (LGA) foi realizada no Primeiro Workshop de Grânulos Aeróbios, 2004 (Munique, Alemanha), considerando-os como agregados de origem microbiana, que não coagulam sob cisalhamento hidrodinâmico reduzido e que possuem velocidade de sedimentação maior que os flocos de lodo ativado (DE KREUK *et al.*, 2005). Devido ao seu tamanho grande e estrutura compacta e densa, os grânulos apresentam altos valores de densidade específica, resultando em uma excelente capacidade de sedimentação, característica que pode ser verificada através do Índice Volumétrico de Lodo (IVL).

Por conta da elevada capacidade de sedimentação, observa-se que os grânulos aeróbios apresentam valores de IVL_{10} (em 10 minutos) muito próximos aos valores de IVL_{30} (em 30 minutos). Por essa razão, a relação

IVL₃₀/IVL₁₀ tem sido utilizada em muitos trabalhos como indicador de granulação. Além disso, um tamanho mínimo para LGA foi fixado em 0,2 mm como referência.

O cultivo de grânulos aeróbios é feito, normalmente, em reatores em batelada sequencial (RBS), caracterizado por operações de ciclos contendo fases de enchimento, reação, sedimentação e descarte do efluente tratado. Esse tipo de sistema facilita a retenção de altas concentrações de lodo e dispensa o uso de sedimentadores secundários com o intuito de separar a biomassa e o efluente tratado (BASSIN, 2012).

O entendimento do processo de formação de grânulos aeróbios é primordial para a sua aplicação em sistemas de tratamento de águas residuárias, e o processo de granulação pode demorar semanas para ter início partindo de um inóculo de um sistema de lodo ativado convencional. Diversos fatores podem interferir na formação dos grânulos, tais como: tipo de substrato, carga orgânica, presença de ligantes químicos, forças de cisalhamento, velocidade de sedimentação e, sobretudo, as culturas microbianas envolvidas (IVANOV *et al.*, 2006; RICKARD *et al.*, 2004; JIANG *et al.*, 2003).

Com o estudo de várias estratégias de granulação, é sabido que a adição de íons bivalentes pode alterar as propriedades desses grânulos (LIU *et al.*, 2010). Foi demonstrado que a adição de Ca²⁺ nesses tipos de sistemas levou ao aumento da rigidez dos grânulos, apesar de também haver diminuído a atividade biológica desses (REN *et al.*, 2008).

Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência de cálcio (Ca²⁺) no IVL e na remoção de carbono, nitrogênio e fósforo em reatores de grânulos aeróbios utilizando a estratégia de regime operacional alimentação/descarte simultâneos em reatores em batelada sequencial.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram montados e operados dois sistemas de lodo ativado em batelada sequencial (RBS) do tipo coluna de bolhas confeccionados em acrílico, com altura de 1 m, diâmetro de 100 mm e volume útil de 8 L, como mostra a Figura 1.

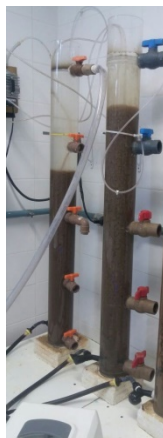


Figura 1: Sistemas de lodo ativado em batelada sequencial (RBS) utilizados na pesquisa.

Ambos os sistemas (R1 e R2) foram inoculados com lodo proveniente de um sistema de lodo ativado tipo carrossel que tratava esgoto doméstico, e alimentados com afluente sintético composto por carbono solúvel (etanol) com concentração em termos de Demanda Química de Oxigênio (DQO) de 800 mg/L, amônio (100 mgN-NH₄⁺/L), fosfato (10 mgP-PO₄³⁻/L), bicarbonato de sódio como alcalinizante (800 mgCaCO₃/L) e micronutrientes (DOS SANTOS, 2005), com pH médio de 7,45. Além disso, no R2, foram acrescentados 100 mgCa²⁺/L na forma de cloreto de cálcio (JIANG *et al.*, 2003). A alimentação foi armazenada em refrigerador para manter uma temperatura média de 4 °C a fim de evitar uma degradação prévia dos compostos do efluente.

Os sistemas foram operados, com alimentação por bombas peristálticas Masterflex modelo BTG 2344, troca volumétrica de 50%, velocidade ascensional de ar superiores a 1,5 cm/s, em ciclos de 6 h (360 min),

compreendendo as fases de alimentação/descarte (simultâneos a uma velocidade de alimentação de 1 m/h), reação anaeróbia/anóxica (sem agitação), reação aeróbia e sedimentação.

Para estimular o processo de granulação, o tempo de sedimentação no ciclo operacional foi diminuído progressivamente, o que dividiu o experimento em três etapas, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Tempos nos ciclos nas três etapas de operação dos sistemas RBS.

	Etapa I	Etapa II	Etapa III
Alimentação/descarte	30 min	30 min	30 min
Anaeróbio/anóxico	90 min	90 min	90 min
Aeróbio	210 min	220 min	230 min
Sedimentação	30 min	20 min	10 min

As concentrações afluentes e efluentes de DQO, $N-NH_4^+$, $N-NO_2^-$, $N-NO_3^-$ e $P-PO_4^{3-}$ foram determinadas duas vezes por semana de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). A sedimentabilidade do lodo foi determinada de acordo com uma versão modificada do IVL sugerido por Schwarzenbeck *et al.* (2004), denominada de IVL dinâmico em diferentes tempos: 5, 10 e 30 minutos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 2 e 3, são apresentados os valores de sólidos suspensos voláteis (SSV) e índice volumétrico de lodo – IVL_5 , IVL_{10} e IVL_{30} , durante o período de operação do sistema. Esses parâmetros representam a estabilidade dos processos e a capacidade de sedimentação do lodo, respectivamente, uma vez que, quanto menor o tempo de separação sólido/líquido, maior a eficiência de tratamento do sistema de lodo ativado em batelada.

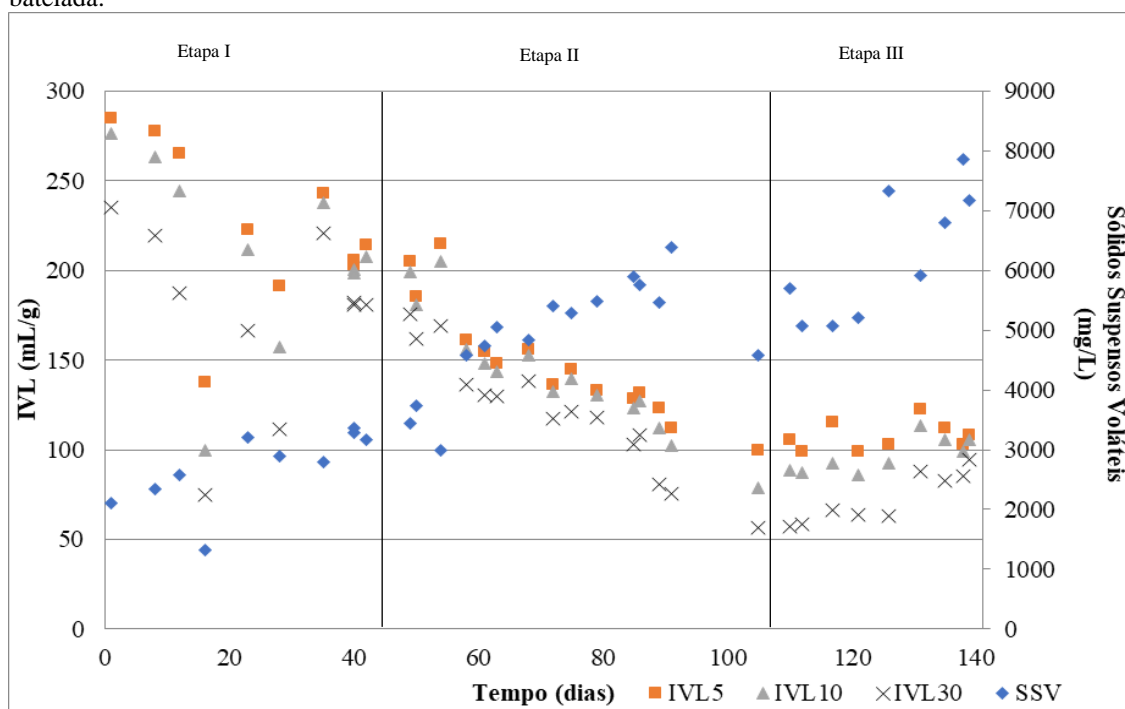


Figura 2: Comportamento dos sólidos suspensos voláteis e índice volumétrico de lodo – IVL_5 , IVL_{10} e IVL_{30} no RBS – sem presença de Ca^{2+} .

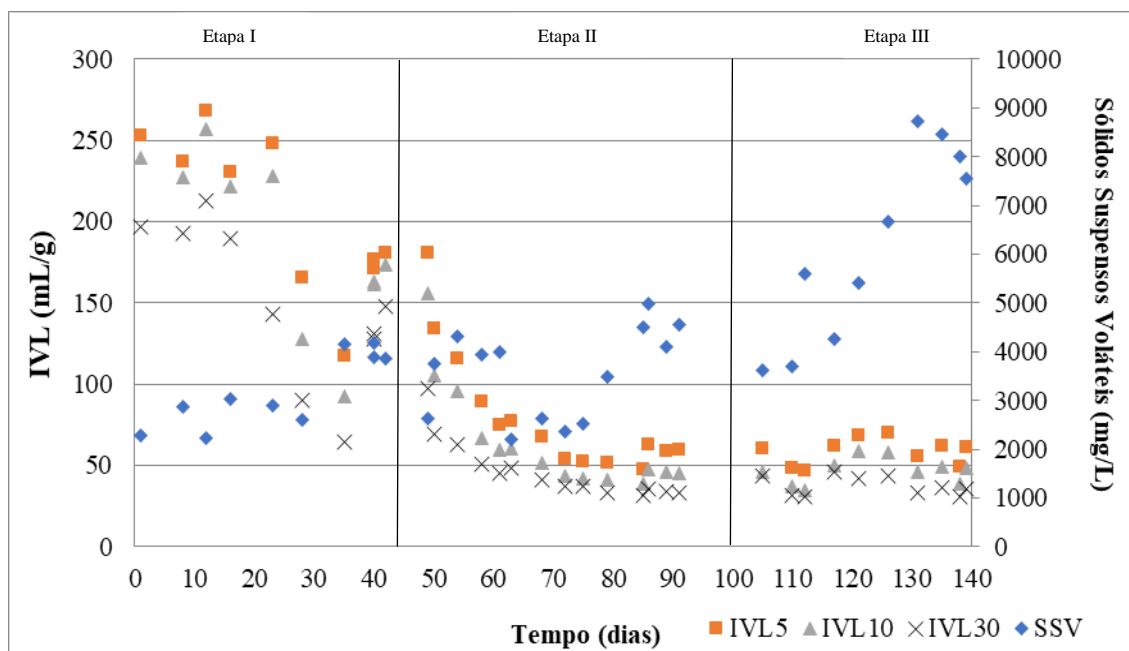


Figura 3: Comportamento dos sólidos suspensos voláteis e índice volumétrico de lodo – IVL₅, IVL₁₀ e IVL₃₀ no RBS – com presença de Ca²⁺.

A análise dos valores de IVL nos tempos de 5, 10 e 30 minutos fornece uma boa caracterização do lodo, pois esse parâmetro influencia diretamente no tempo de retenção de sólidos nesse tipo de sistema. Ao analisar o comportamento dos testes nas Figuras 2 e 3, é possível identificar que, com a diminuição do tempo de sedimentação, as diferenças entre os três valores tornam-se menores, significando que o lodo gerado nos dois sistemas apresentou resultados melhores de sedimentabilidade na etapa III que na fase inicial do experimento.

Quando se compara o desempenho dos dois reatores, observa-se que a presença do cálcio influenciou positivamente nos dados analisados, chegando a apresentar valores médios na etapa III de IVL₅ de 58,6±10,1 mL/g, IVL₁₀ de 47,48±10,2 mL/g e IVL₃₀ de 38,0±7,0 mL/g, enquanto que as médias de R1 foram IVL₅ de 107,4±9,5 mL/g, IVL₁₀ de 93,5±10,0 mL/g e IVL₃₀ de 66,0±11,3 mL/g, imprimindo variação menor que 20%. Cabe destacar que, durante toda a etapa III, o sistema R2 apresentou valores de sedimentabilidade melhores que o sistema R1.

Os valores encontrados na pesquisa se assemelham aos encontrados na literatura (< 100 mL/g) com o objetivo de granulação de lodo aeróbio (LIU *et al.*, 2010; WEI *et al.*, 2012; MORALES *et al.*, 2013; WAGNER, 2015; DAUDT 2015). Tratando efluente doméstico em sistema RBS tipo coluna de bolhas, Wagner (2015) obteve valor de IVL₃₀ de 53 mL/g, com tempo de sedimentação de 15 minutos. Também utilizando o mesmo tipo de efluente e tempo de sedimentação, Xavier (2017) obteve um valor médio de 70 mL/g para o IVL₃₀. Assim, os valores médios encontrados na etapa III nos dois sistemas se assemelham aos encontrados na literatura.

Geralmente, quanto mais os valores de IVL₁₀ se aproximam dos valores de IVL₃₀, menor é a presença de lodo flocculento, consequentemente maior é a concentração de lodo granular (BASSIN, 2011), pois indica que o volume de lodo sedimentado em 10 minutos é próximo do volume no tempo de 30 minutos. Dessa forma, os valores encontrados no estudo indicam que o lodo presente no R2 possui características de lodo granular maior que no R1.

Pode-se observar que os dois sistemas se comportaram muito bem à diminuição do tempo de sedimentação da etapa I para a etapa II, já que os valores de IVL diminuíram consideravelmente. Em comparação com os dados de IVL da etapa III, o reator suplementado com cálcio (R2) apresentou uma estabilidade maior comparado ao R1, já que manteve aproximadamente os mesmos valores de IVL desde a metade da etapa II.

Com o uso de cálcio, foi possível reter maior concentração de SSV no reator, o que caracteriza maior estabilidade aos processos de remoção de matéria orgânica (em termos de DQO), nitrogênio (nitrificação e desnitrificação) e fósforo. Os comportamentos das concentrações da carga orgânica e dos macronutrientes presentes no tratamento durante o período experimental estão nas Figuras 4, 5 e 6.

A remoção de matéria orgânica apresentou comportamentos e valores bastante semelhantes, sendo evidentemente satisfatória nos dois sistemas durante as três etapas de monitoramento, situando-se sempre em torno de 95% e mostrando que a concentração de Ca^{2+} não interferiu na eficiência de tratamento. Na Figura 4, é apresentado as variações da DQO afluente e efluente aos dois reatores, onde se pode observar os valores baixíssimos de DQO efluente.

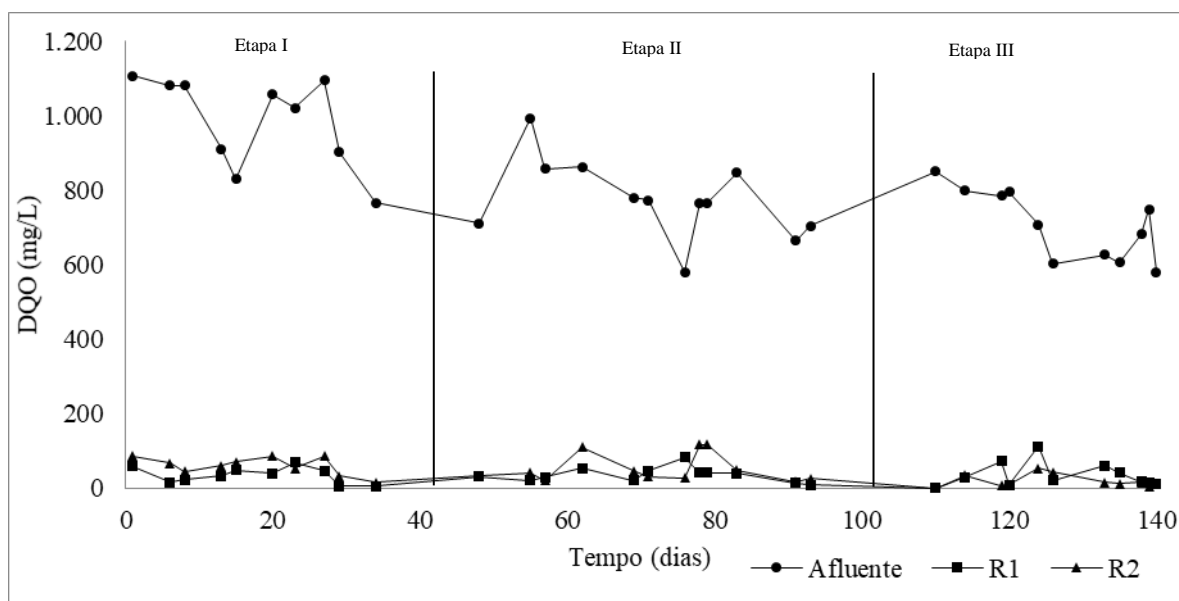


Figura 4: Comportamento da DQO no afluente e nos efluentes dos dois reatores.

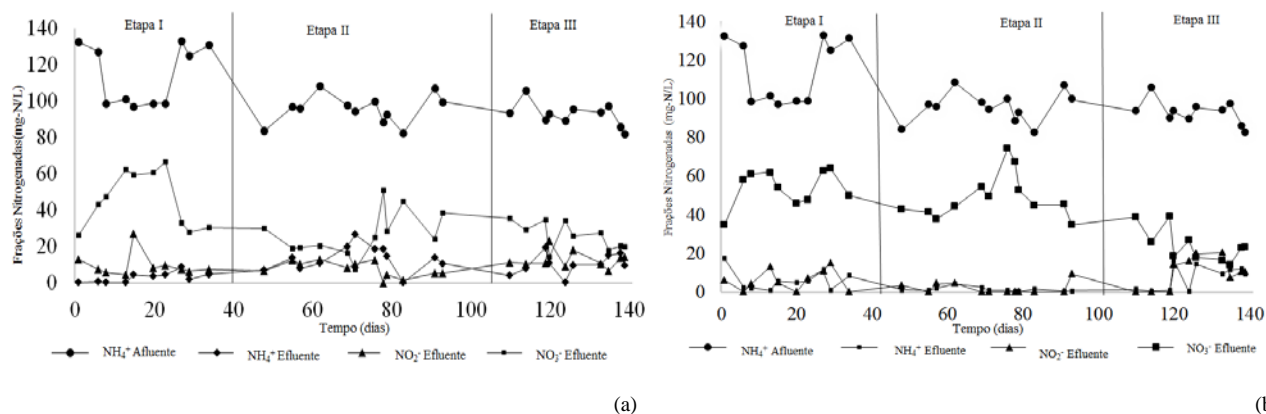


Figura 5: Comportamento das concentrações de diversas formas de nitrogênio no afluente e nos efluentes no reator R1 (a) e R2 (b).

Na Figura 5, pode-se observar mais uma vez que ambos os reatores possuem resultados similares, sendo agora com relação a eficiência de remoção de nitrogênio, apesar de o R1 (sem adição de cálcio) se apresentar levemente mais eficiente no processo de desnitrificação. Tal fato pode ser melhor observado pelos valores menores de nitrato no efluente, principalmente no final da etapa I e durante a etapa II. Entretanto, a conversão de nitrito e nitrato em nitrogênio gasoso apresentou valores entre 38% e 56%. Esse acúmulo de nitrito e nitrato pode estar relacionado à curta fase anóxica do ciclo e à elevada taxa de aeração durante a fase aeróbia. Com

relação à nitrificação, pode-se afirmar que ocorreu satisfatoriamente e que os dois sistemas permaneceram praticamente todo o tempo de operação com remoção superior a 90%.

No tocante à remoção de fósforo, pelos valores mostrados na Figura 6, pode-se perceber que semelhante à remoção de carbono e nitrogênio, foram obtidos resultados extremamente parecidos entre os sistemas estudados, visto que as concentrações de ortofosfato nos efluentes de ambos foram quase todas muito próximas, exceto nos dias 23 e 48, em que o percentual de remoção de R2 foi consideravelmente maior que o de R1. A média de remoção nos dois reatores foi de 43%, o que não é tão satisfatório e tem como possível explicação o curto período de tempo dedicado à fase anaeróbia/anóxica em relação ao tempo total do ciclo.

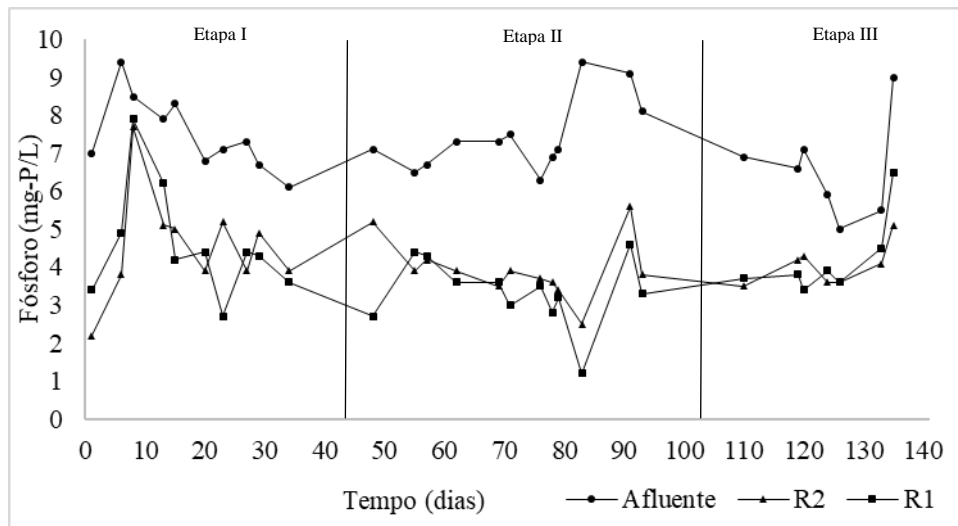
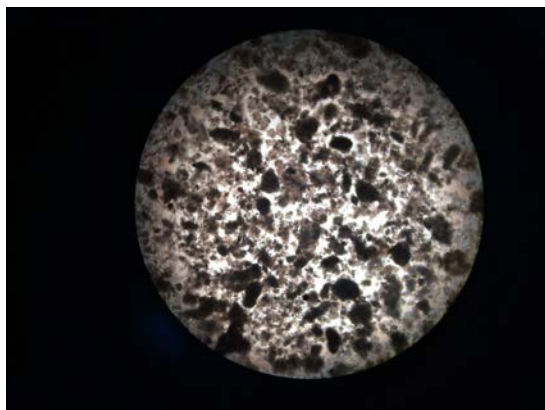


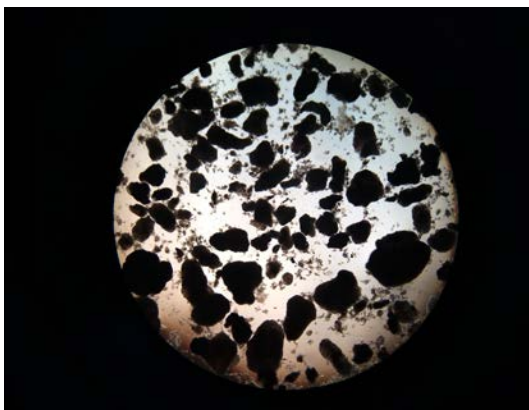
Figura 6: Comportamento das concentrações de ortofosfato no afluente e nos efluentes dos dois reatores.

Outra possível explicação é a utilização de etanol como fonte de carbono. Lin Liu (2010), utilizando glicose como substrato orgânico, analisou o uso de cálcio no processo de granulação e não observou alterações nas remoções de carbono, nitrogênio e fósforo, com percentuais de remoção de 94%, 92% e 97%, respectivamente. O principal motivo para justificar a baixa remoção de fósforo é a fonte de matéria orgânica utilizada no sistema, uma vez que etanol não se apresenta como composto mais indicado para o processo de biodesfosfatação (SANTOS, 2014).

Em termos de morfologia, ao observar as Figuras 7 e 8, pode-se perceber que os grânulos têm aspecto que demonstra claramente a influência do íon bivalente de cálcio no lodo presente no reator. Tanto R1 quanto R2 apresentaram grânulos maiores que 0,2 mm, porém, no reator em que foi adicionado cálcio (R2), observou-se que, em sua maioria, os grânulos são consideravelmente maiores e predominantes do que em R1, o qual apresentou um lodo de aspecto majoritariamente filamentosos e irregular, confirmando o fato de que a adição de cálcio melhora as condições de sedimentabilidade e, consequentemente, os valores de IVL do lodo em questão, conforme apresentado nas Figuras 2 e 3. Isso se deve provavelmente ao fato de que os cristais do cátion servem como núcleo de agregação microbiana, facilitando, assim, a formação de grânulos de forma mais rápida e com tamanhos maiores, apresentando maiores resistências às tensões de cisalhamento e, consequentemente, aos processos de desagregação.

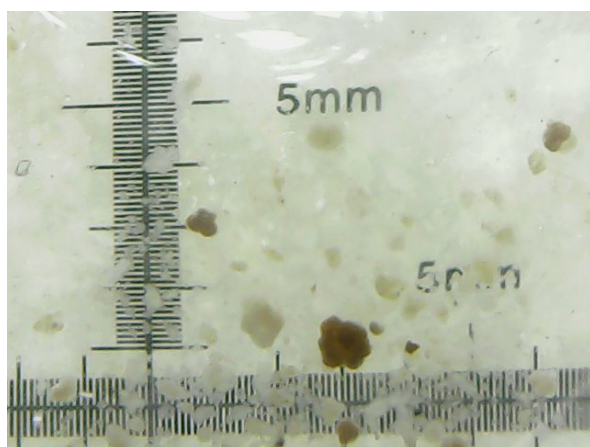


(a)

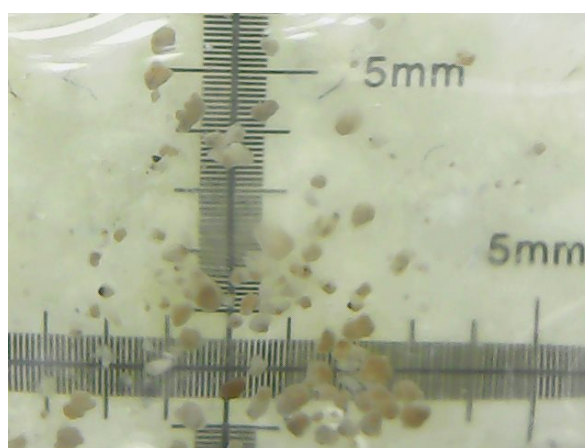


(b)

Figura 7: Fotomicroscopia dos grânulos de R1 (a) e R2 (b) com zoom ótico de 4x.



(a)



(b)

Figura 8: Amostra de grânulos de R1 (a) e R2 (b) sobre malha milimetrada para fins de medição de tamanho.

CONCLUSÕES

No geral, observou-se que o uso de cálcio se mostra como uma boa estratégia para favorecer o processo de granulação aeróbia, pois atua como fonte agregadora da comunidade microbiana, melhorando a sedimentabilidade do lodo granular sem comprometer os principais processos bioquímicos dos sistemas de tratamento. Entretanto, não houve diferenças notórias nos percentuais de remoção, sugerindo que a adição de Ca^{2+} a um reator inoculado com lodo ativado não interfere de maneira marcante nos processos de nitrificação, desnitrificação, biodesfosfatação e remoção de DQO, e, consequentemente, na eficiência de tratamento de esgotos.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) ETes Sustentáveis do CNPq pelo suporte financeiro, assim como ao CNPq pelas bolsas de pesquisa concedidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADAV, S. S.; LEE D. J.; SHOW, K.; TAY J. H. Aerobic granular sludge: Recent advances. *Biotechnology Adv.*, v. 26, pp. 411-423. 2009.
2. APHA, 2012. *Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater*, 22nd Ed.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, DC.
3. BASSIN, J.P. Tecnologia de granulação aeróbia (lodo granular aeróbio). In: DEZOTTI, M., SANT'ANNA JR., G.L., BASSIN, J.P. (Org.). *Processos biológicos avançados para tratamento de efluentes e técnicas de biologia molecular para o estudo da diversidade microbiana*. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011, p 91-170.
4. BASSIN, J.P., KLEEREBEZEM, R., DEZOTTI, M., VAN LOOSDRECHT M.C.M. Simultaneous nitrogen and phosphate removal in aerobic granular sludge reactors operated at different temperatures. *Water Research*, vol. 46, p. 3805-3816, 2012.
5. DAUDT, G.C. Desempenho e emissões de óxido nitroso de reator em bateladas sequencias com grânulos aeróbios para tratamento de esgoto sanitário. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis (SC), 141p., 2015.
6. DE KREUK, M.K.; MCSWAIN, B.S.; BATHE, S.; TAY, S.T.L.; SCHWARZENBECK, N.; WILDERER, P.A. (2005) Discussion outcomes. In: *Aerobic granular sludge*. Water and Environmental Management Series. London: IWA Publishing, p. 155-169.
7. DOS SANTOS, A. B. Aplicação conjunta de tratamento anaeróbio termofílico por lodo granular e de mediadores redox na remoção de cor de águas residuárias têxteis. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 10, p. 253-259, 2005.
8. IVANOV, V.; WANG, X. H.; TAY, S. T. L.; TAY, J.H., 2006, "Bioaugmentation and enhanced formation of microbial granules used in aerobic wastewater treatment", *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 70, p. 374-381.
9. JIANG, H.L.; TAY, J. H.; LIU, Y.; TAY, S. T. L. Ca²⁺ augmentation for enhancement of aerobically grown microbial granules in sludge blanket reactors. *Biotechnology Letters*, v. 25, p. 95-99, 2003.
10. LIU, Y.Q.; MOY, B.; KONG, Y.H.; TAY, J.H. Formation, physical characteristics and microbial community structure of aerobic granules in a pilot-scale sequencing batch reactor for real wastewater treatment. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 46, p. 520-525, 2010.
11. LIUA, L.; GAO, D. W.; ZHANG, M.; FUB, Y. Comparison of Ca²⁺ and Mg²⁺ enhancing aerobic granulation in SBR. *Journal of Hazardous Materials*, v. 181, p. 382-387, 2010.
12. MORALES, N.; FIGUEROA, M.; FRA-VAZQUEZ, A.; VAL DEL RÍO, A.; CAMPOS, J. L.; MOSQUERA-CORRAL, A.; MENDEZ, R. Operation of an aerobic granular pilot scale SBR plant to treat swine slurry. *Process Biochemistry*, v. 48, p. 1216-1221, 2013.
13. RICKARD, A. H.; GILBERT, P.; HANDLEY, P. S., 2004, "Influence of growth environment on coaggregation between freshwater biofilm bacteria", *Journal of Applied Microbiology*, v. 96, p. 1367-1373.
14. SANTOS, E. V. M. Estratégias para predominância de organismos acumuladores de fósforo em sistemas de lodo ativado e respirometria aplicada à biodesfosfatação. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba. 267 p. 2014.
15. SCHWARZENBECK, N., ERLEY, R., WILDERER, P.A. Aerobic granular sludge in an SBR-system treating wastewater rich in particulate matter. *Water Science & Technology*, v.49, p.41-46, 2004.
16. WAGNER, J.; COSTA, R. H. R. Reator em bateladas sequenciais de grânulos aeróbios: estudo da formação dos grânulos e do efeito da duração do ciclo na remoção de carbono, nitrogênio e fósforo de esgoto doméstico. *Engenharia Sanitária Ambiental*, v. 20, n. 2, p.269-278, abr/jun. 2015.
17. WEI, D.; SI, W.; ZHANG, Y.; QIAO, Z.; YAO, Z.; ZHAO, W.; ZHAO, J.; CHEN, G.; WEI, Q.; DU, B. Aerobic granulation and nitrogen removal with the effluent of internal circulation reactor in start-up of a pilot-scale sequencing batch reactor. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 35, p.1489-1496, 2012.
18. XAVIER, J. A. Granulação natural da biomassa em reator operado em bateladas sequenciais para tratamento de esgoto sanitário. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 141 f. 2017.