



## II - 448 - REMOÇÃO DE NUTRIENTES EM REATOR DE LODO GRANULAR AERÓBIO: INFLUÊNCIA DA FASE ANAERÓBIA E CONDIÇÃO DE MISTURA

### **Bárbara Karoline Soares Fernandes Dantas<sup>(1)</sup>**

Engenheira Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Mestra e doutoranda em Engenharia Civil (Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Analista Ambiental pela Prefeitura do Paulista-PE.

### **Oucilane Ingret Moreno Alves<sup>(1)</sup>**

Engenheira Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Mestra e doutora em Engenharia Civil (Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

### **Bruna Scandolaro Magnus<sup>(1)</sup>**

Engenheira Sanitária e Ambiental. Mestra e Doutora em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

### **Mario Takayuki Kato<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Mestre em Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento) pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP). Doutor em Tecnologia Ambiental e Ciências da Agricultura pela Universidade Agrícola de Wageningen, Holanda. Professor Titular do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

### **Maria de Lourdes Florencio dos Santos<sup>(1)</sup>**

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Mestra em Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento) pela Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo (USP). Doutora em Ciências Agrícolas e Ambiental (Tecnologia Ambiental) pela Universidade de Wageningen - Holanda. Professora Titular do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Laboratório de Saneamento Ambiental – LSA/UFPE. Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n. Cidade Universitária. CEP 50740-530. Recife-PE - Brasil - Tel: +55 81 2126-8229/8716 - e-mail: [barbara.dantas@ufpe.br](mailto:barbara.dantas@ufpe.br)

### **RESUMO**

O lodo granular aeróbio é uma tecnologia bastante promissora para o tratamento de esgoto devido ao seu bom desempenho na remoção de matéria orgânica e nutrientes, utilizando reatores compactos. É considerada uma adaptação do sistema de lodos ativados, com vantagens como menor demanda por área e reduções de custos com destinação do lodo e energia bastante significativas. Sua plena aplicação nas estações de tratamento de esgoto (ETE) ainda é um desafio, devido a dificuldade de manutenção da estabilidade dos grânulos aeróbios a longo prazo, e longos períodos de partida nos reatores quando baixa carga orgânica é aplicada, como é o caso do esgoto doméstico. A inserção de fase anaeróbia no ciclo é estratégica, pois beneficia o crescimento de organismos de crescimento lento nos grânulos aeróbios, que beneficiam a estabilidade granular e ainda contribuem com a remoção biológica de nutrientes. Dessa forma, o presente trabalho objetivou desenvolver grânulos aeróbios a partir de esgoto doméstico de baixa concentração ( $281,9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $1,21 \text{ kg}\cdot\text{DQO}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ ) com inserção de fase anaeróbia no ciclo, avaliando a performance do reator na degradação de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo. Foi alcançado reator predominantemente granular (> 50% de grânulos) aos 79 dias de operação, sendo obtidas remoções consideráveis de matéria orgânica (> 80%), fósforo (48%) e nitrogênio amoniacal (> 90%), com acúmulo de nitrito e nitrato no reator, indicando que a nitrificação e desnitrificação simultânea (NDS) foi possivelmente prejudicada devido ao pequeno tamanho dos grânulos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Lodo granular aeróbio, remoção de nitrogênio, remoção de fósforo, esgoto doméstico.

## INTRODUÇÃO

Os grânulos aeróbios são agregados microbianos auto-imobilizados, densos e compactos que permitem uma melhor separação do lodo, bem como maiores concentrações de biomassa comparado ao sistema de lodos ativados convencional (LAC) (FRANCA et al., 2018). Além da boa sedimentabilidade e alta capacidade de retenção de biomassa, outra vantagem do lodo granular aeróbio (LGA) comparado ao LAC é que os processos físicos e biológicos ocorrem em um único tanque, geralmente em reator em bateladas sequenciais (RBS), tornando dispensável o uso de decantador secundário, diminuindo assim a demanda por espaço nas ETEs.

Alguns estudos demonstram ser promissora a aplicação de LGA no tratamento de esgoto doméstico de baixa concentração (NI et al., 2009, LIU et al., 2010, PRONK et al., 2015, DERLON et al., 2016, ALVES et al., 2022). Além de matéria orgânica, os grânulos aeróbios são capazes de remover nutrientes naturalmente presentes no esgoto através de sua estrutura estratificada que surge devido ao limite de difusão de oxigênio no interior dos grânulos. O surgimento de tal gradiente promove a formação de distintas camadas: aeróbia, anóxica e anaeróbia. A camada aeróbia, na parte mais superficial do grânulo, permite o desenvolvimento de bactérias nitrificantes; enquanto que seu núcleo anóxico ou anaeróbio permite a coexistência de bactérias desnitrificantes e organismos acumuladores de polifosfato - PAO (PRONK et al., 2015) que consomem os nutrientes presentes no esgoto, promovendo assim sua remoção biológica.

Alguns estudos têm reportado que a fase anaeróbia no ciclo pode ser benéfica para a estabilidade granular e o desempenho do sistema de LGA de um modo geral. Devlin et al (2017) verificaram que a utilização anaeróbia de matéria orgânica diminuiu a produção de micro-organismos aeróbios de crescimento rápido, favorecendo assim a estabilidade granular. Os pesquisadores adotaram em seu estudo alimentação anaeróbia de 60 min durante o ciclo e concentração de DQO de  $340 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , sendo o reator operado sob baixa tensão de cisalhamento ( $0,41 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Sguanci et al (2019), tratando esgoto de baixíssima concentração ( $< 120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) adotaram estratégia de pressão seletiva metabólica rigorosa em reator de grânulos aeróbios. Tal estratégia visou maximizar a absorção de DQO biodegradável anaeróbia por organismos de crescimento lento, como PAOs e GAOs (organismos acumuladores de glicogênio), controlando dinamicamente a duração de uma fase mista anaeróbia após a alimentação anaeróbia, evitando a competição com biomassa heterotrófica aeróbia convencional e a formação de flocos. Os pesquisadores alcançaram grânulos estáveis e densos, com alta eficiência na remoção de DQO e fosfato, e diâmetro médio de 1,5 mm no final da fase experimental, com poucos flocos ( $< 5\%$ ).

A formação de LGA cultivados com esgoto doméstico de baixa concentração ainda é um desafio, haja vista essa condição dificultar o desenvolvimento dos grânulos, necessitando, portanto, de aprofundamento para sua plena aplicação ao esgoto doméstico, que naturalmente é diluído. Ainda são menos comuns os estudos em escala piloto, que tratam de uma aplicação mais próxima da real, o que aumenta a relevância deste estudo. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver grânulos aeróbios a partir de esgoto doméstico de baixa concentração, avaliando a influência de fase anaeróbia e condição de mistura na remoção de nutrientes e matéria orgânica carbonácea.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### SISTEMA EXPERIMENTAL

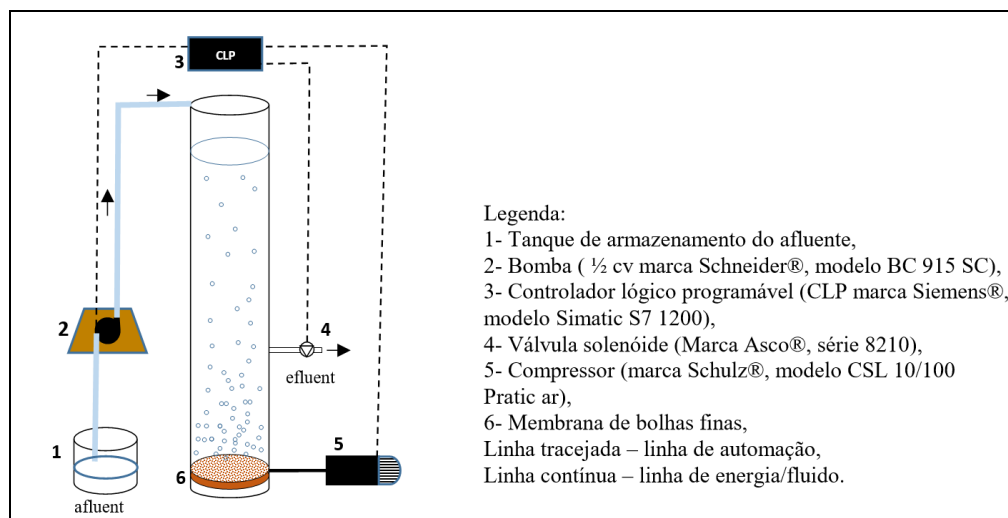
Foi utilizado nesta pesquisa esgoto de origem essencialmente doméstica proveniente de ETE localizada em Recife, PE. O reator foi confeccionado em coluna de acrílico transparente cujas dimensões encontram-se na Tabela 1. Um controlador lógico programável (CLP) foi utilizado para automatizar as bateladas do ciclo. A Figura 1 ilustra a representação esquemática do sistema experimental. Após tratamento preliminar, o esgoto afluente à ETE foi conduzido para um tanque de armazenamento ( $1 \text{ m}^3$ ), e posteriormente introduzido no reator por bombeamento cuja alimentação foi descensionada a fim de evitar a quebra dos grânulos formados. Para aeração do reator foi utilizado um compressor de ar, sendo a vazão controlada através de um rotâmetro ( $27,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ). O ar foi distribuído através de



difusor circular de membrana de bolhas finas localizado no fundo do reator. A cada ciclo 82,5 L do efluente tratado foram descartados configurando troca volumétrica de 71%.

**Tabela 1: Características Geométricas do reator.**

Altura útil m	Diâmetro Interno m	Volume Útil L	Volume total L	Altura da Troca Volumétrica m
2,45	0,245	115,5	141,4	0,70 (71%)



**Figura 1: Aparato experimental.**

## OPERAÇÃO DO REATOR

O reator não foi inoculado de modo a permitir que a biomassa se desenvolvesse naturalmente. Desde o início da operação foi fixado tempo de sedimentação curto (20 min) a fim de selecionar flocos densos que viabilizassem sua transformação à biomassa granular. O reator funcionou em bateladas sequenciais (RBS) cujos ciclos tiveram duração de 4 h (totalizando 6 ciclos diários) contemplando as etapas de enchimento (2 min), fase anaeróbia (90 min), fase aeróbia (124 min), sedimentação (20 min) e descarte (4 min). Durante a fase anaeróbia foram injetados pulsos de ar a cada 20 min durante 4 s visando promover o contato da biomassa com o substrato presente no esgoto, sem alterar significativamente o OD. A inserção de fase anaeróbia no ciclo teve como objetivo favorecer a formação de micro-organismos acumuladores de fósforo, e produtores de substâncias poliméricas extracelulares – EPS, resultando em biomassa mais estável, com estratificação mais definida, e portanto, eficiente na remoção de fósforo e nutrientes.

## MONITORAMENTO DO REATOR E CARACTERIZAÇÃO DO ESGOTO

O acompanhamento do reator foi realizado por coletas semanais de amostras do afluente, licor misto (nos finais das fases anaeróbia e de aeração) e efluente tratado. As análises físico-químicas e o teste de granulometria seguiram as metodologias descritas por APHA (2012) e Bin et al. (2011), respectivamente. O esgoto (Tabela 2) pode ser classificado como esgoto de baixa concentração segundo Metcalf e Eddy (2016).

**Tabela 2: Caracterização do afluente.**

Parâmetros	Média e desvio (mg·L <sup>-1</sup> )	Parâmetros	Média e desvio (mg·L <sup>-1</sup> )
Sólidos totais	618,0 ± 173,8	Nitrogênio total	39,0 ± 12,6
Sólidos suspensos totais	108,0 ± 45,5	Nitrogênio amoniacal	32,0 ± 5,7
DQO total	281,9 ± 51,9	Fósforo total	4,1 ± 0,6
DQO solúvel	94,9 ± 14,9	Otofósforo	3,2 ± 0,6

## RESULTADOS

Neste estudo, a granulação do reator foi atingida aos 79 dias de operação, momento em que houve predominância de biomassa granular, e concentração média de SSVLM de  $1,67 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ . Os resultados serão apresentados e discutidos com enfoque no período granular, cujo início encontra-se destacado nos gráficos.

### FORMAÇÃO DOS GRÂNULOS

Por microscopia foi detectada a presença de pequenos agregados granulares aos 58 dias de operação. A granulação foi atingida aos 79 dias, momento este em que as partículas com diâmetro superior a 0,2 mm representaram pouco mais de 50% da biomassa. O diâmetro dos grânulos variou de 0,2 a 2,0 mm, com predominância de grânulos pequenos (entre 0,2 e 0,6 mm). A Figura 2 apresenta o aspecto da biomassa, percebendo-se a coexistência de flocos e grânulos.

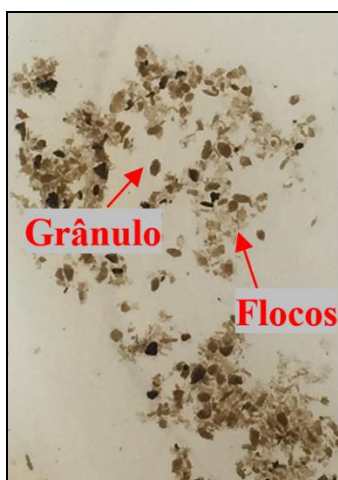


Figura 2: Coexistência de flocos e grânulos.

### REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA CARBONÁCEA E NUTRIENTES

As concentrações de matéria orgânica carbonácea no afluente e efluente foram quantificadas em termos de demanda química de oxigênio (DQO). A remoção média de DQO durante o período granular foi praticamente estável, apresentando média de 82,3%.

As concentrações de amônio no afluente e efluente, bem como as concentrações de nitrito e nitrato no efluente, e as eficiências de remoção de amônio obtidas ao longo do experimento são mostradas na Figura 3. Durante o período em que a biomassa era inteiramente floclulenta, a remoção de nitrogênio amoniacal foi inferior a 30%, e não houve formação de nitrito e nitrato. Com o surgimento de grânulos aeróbios, as remoções de amônio aumentaram, sendo que durante o período granular a eficiência média de 94,6%, no entanto houve considerável produção de nitrito e nitrato, com médias de  $5,2$  e  $23,4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectivamente.

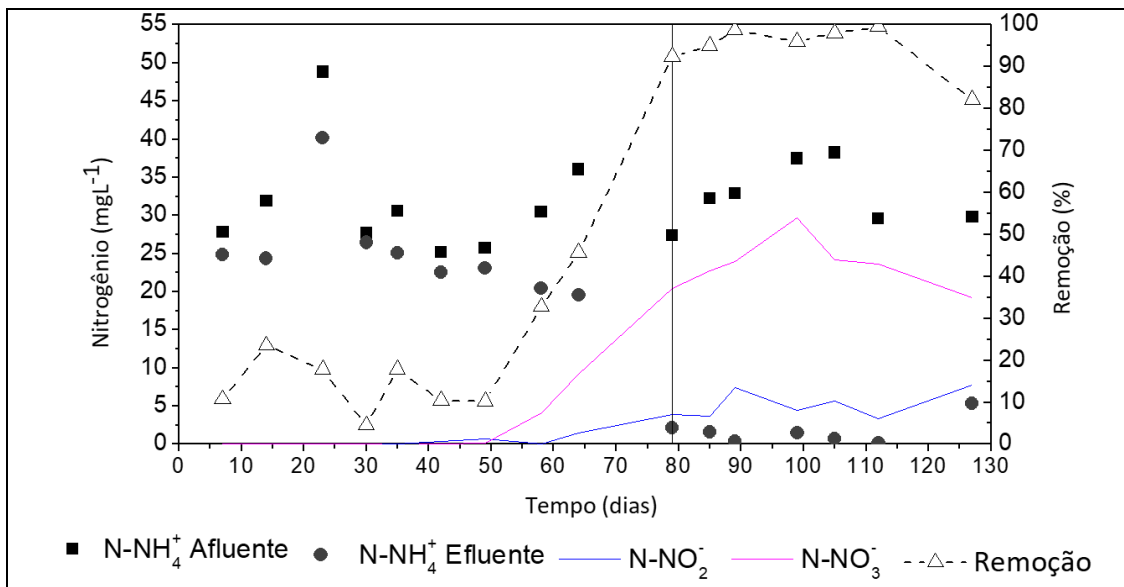


Figura 3: Amônio afluente e efluente, nitrito e nitrato no efluente e remoção de amônio.

As concentrações de fósforo total no afluente e efluente, bem como as eficiências de remoção obtidas durante todo o período experimental são apresentadas na Figura 4. Percebe-se que as remoções de fósforo total foram instáveis, sendo obtidos do período granular maiores remoções. A eficiência de remoção média de fósforo total no período granular foi de 48,0 %, e respectivas mínimas e máximas 8,9 % e 87,6%.

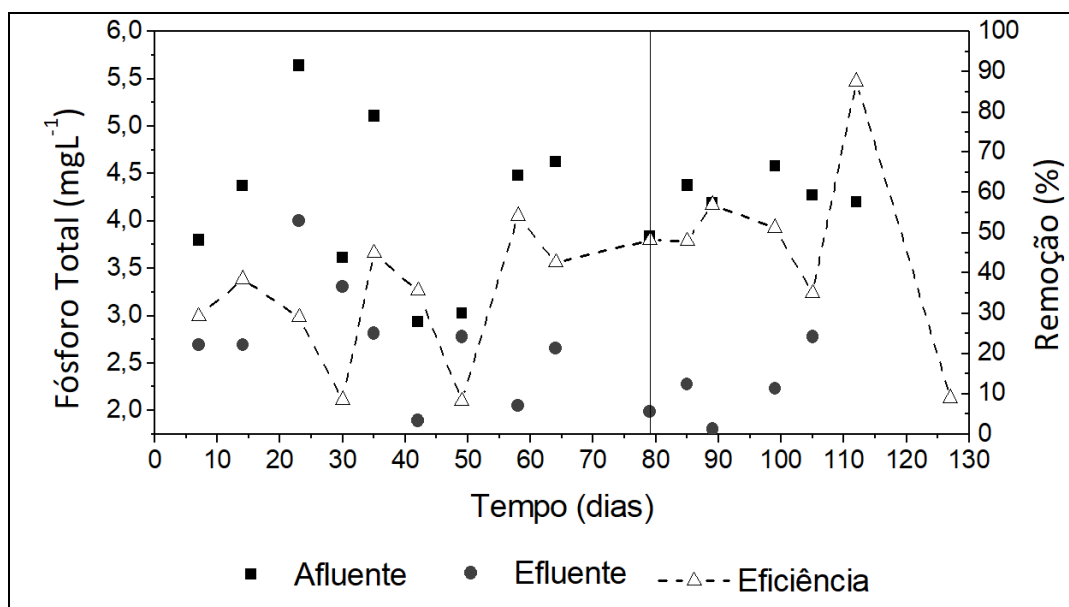


Figura 4: Fósforo total afluente e efluente e remoção de fósforo total.

#### DISCUSSÃO INTEGRADA DOS RESULTADOS

Houve predominância de grânulos no reator (> 50% de biomassa granular), possuindo majoritariamente tamanho pequeno (entre 0,2 e 0,6 mm) possivelmente devido à baixa carga orgânica aplicada. Este resultado corroborou com Derlon et al. (2016), que obtiveram grânulos pequenos em condição análoga (diâmetro de 0,2 a 1,3 mm).



Quanto ao parâmetro DQO, o reator apresentou alta eficiência de remoção (superior a 80%), concordando com o estudo de Ni et al. (2009), que alcançaram eficiência de remoção de DQO entre 85 e 95% operando RBS granular alimentado com esgoto de baixa concentração (DQO 95-200 mg·L<sup>-1</sup>) em ciclos de 3 h.

Discutindo a Figura 3, percebe-se que o desenvolvimento das bactérias nitrificantes foi gradual e lento. A aplicação de curtos tempos de sedimentação (20 min) provavelmente prejudicou o estabelecimento da biomassa nitrificante no reator, provocando constantes lavagens destes micro-organismos a cada ciclo (*wash-out* da biomassa). Com a agregação da biomassa ao longo do experimento e o surgimento de pequenos grânulos, as bactérias nitrificantes conseguiram permanecer no reator, encontrando na biomassa granular e nos flocos densos meio suporte para seu desenvolvimento. Após atingida granulação, as eficiências de remoção de amônio foram altas (> 90%), no entanto houve produção de nitrito e nitrato considerável, indicando que não houve nitrificação e desnitrificação simultânea - NDS. Observou-se que o nitrato foi removido durante a fase anóxica/anaeróbia do ciclo, sendo produzido durante a fase aeróbia. O acúmulo de nitrito/nitrato tratando esgoto doméstico é um problema que já vem sendo bastante reportado em literatura para LGA (NI et al., 2009; LIU et al., 2010; DERLON et al., 2016; ARAÚJO, 2022; ALVES et al, 2022). A inibição de NDS pode ter ocorrido devido ao pequeno tamanho dos grânulos, que resultou em menores volumes de zona anóxica.

A remoção de fósforo total do reator durante o período granular foi instável com média de 48,0 %. A baixa concentração de fósforo no afluente pode ter prejudicado o processo biológico de remoção de fósforo, pois pode ter favorecido o desenvolvimento de organismos acumuladores de glicogênio (GAO). Tais micro-organismos competem com os organismos acumuladores de fosfato - PAO por substrato, no entanto, não contribuem para a remoção de fósforo (OHEMEN et al., 2005). Ainda assim, foi obtida remoção significativa de fósforo. No geral, verificou-se que a fase anaeróbia do ciclo com os pulsos de ar beneficiou a remoção de nutrientes.

## CONCLUSÕES

Foi possível desenvolver lodo granular aeróbio a partir de esgoto doméstico de baixa concentração, obtendo efluente tratado com boa qualidade quanto a remoção de matéria orgânica e nutrientes com a inserção de fase anaeróbia no ciclo e pulsos de ar. Os grânulos formados foram predominantemente pequenos, o que prejudicou a estratificação de sua estrutura, prejudicando a ocorrência de nitrificação e desnitrificação simultânea – NDS. Desse modo, a desnitrificação do efluente ocorreu durante a fase anóxica/anaeróbia do ciclo. Ainda assim, houve elevada eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal (superior a 90%). A remoção de fósforo pode ter sido prejudicada pela existência de GAO, que competiram com os PAO, não incrementando na remoção de fósforo, sendo obtida média de 48%. A remoção de matéria orgânica carbonácea foi superior a 80% durante todo o experimento. De um modo geral, considera-se que a aplicação da tecnologia de LGA com inserção de fase anaeróbia com pulsos de ar em esgoto doméstico diluído foi satisfatória, obtendo remoções consideráveis de matéria orgânica, nitrogênio orgânico e amoniacal, e fósforo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALVES, O. I. M.; ARAÚJO, J. M.; SILVA, P. M. J.; MAGNUS, B. S.; GAVAZZA, S.; FLORENCIO, L.; KATO, M. T. Formation and stability of aerobic granular sludge in a sequential batch reactor for the simultaneous removal of organic matter and nutrients from low-strength domestic wastewater. *Science of the Total Environment*, v. 843, 2022.
2. APHA, AWWA, and WPCF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 22th ed. Baltimore: Port City Press, 2012.
3. ARAÚJO, J. M. P. A. *Influence Of Temperature And Diffusion On Aerobic Granular Sludge For Municipal Wastewater Treatment: Experimental And Modeling Studies*. Universidade Federal de Pernambuco. Tese de Doutorado. 2022.



4. BIN, Z.; ZHE, C.; ZHIGANG, Q.; MIN, J.; ZHIQIANG, C.; ZHAOLI, C.; JUNWEN, L.; XUAN, W.; JINGFENG, W. Dynamic and distribution of ammonia-oxidizing bacteria communities during sludge granulation in an anaerobic-aerobic sequencing batch reactor. *Water Research*, v. 45, p. 6207-6216, 2011.
5. DERLON, N., WAGNER, J., DA COSTA, R., MORGENROTH, E. Formation of aerobic granules for the treatment of real and low-strength municipal wastewater using a sequencing batch reactor operated at constant volume. *Water Research*, v. 105, p. 341-350, 2016.
6. DEVLIN, T.R., BIASE, A., KOWALSKI, M., OLESZKIEWICZ, J. A. Granulation of activated sludge under low hydrodynamic shear and different wastewater characteristics. *Bioresource Technology*, 2017.
7. FRANCA, R. D. G., PINHEIRO, H. M., VAN LOOSDRECHT, M. C. M., LOURENÇO, N. D. Stability of aerobic granules during long-term bioreactor operation. *Biotechnology Advances*, v. 36, p. 228-246, 2018.
8. 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.
9. METCALF e EDDY. *Tratamento de efluentes e recuperação de recursos*. 5. ed., Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 1980 p., 2016.
10. NI, B., XIE, W., LIU, S., HAN, H., WANG, Y., WANG, G., DAI, X. Granulation of activated sludge in a pilot-scale sequencing batch reactor for the treatment of low-strength municipal wastewater. *Water Research*, v. 43, p. 751-761, 2009.
11. OEHMEN, A.; KELLER-LEHMANN, B.; ZENG, R. J.; YUAN, Z. E KELLER, J. Optimisation of poly- $\beta$ -hydroxyalkanoate analysis using gas chromatography for enhanced biological phosphorus removal systems. *Journal of Chromatography A*, v. 1070, p. 131-136, 2005.
12. PRONK, M., de KREUK, M. K., de BRUIN, B., KAMMINGA, P., KLEEREBEZEM, R., van OOSDRECHT M.C.M. Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment. *Water Research*, v. 84, p. 207-217, 2015.
13. SGUANCI, S., LUBELLO, C., CAFFAZ, S., LOTTI, T. Long-term stability of aerobic granular sludge for the treatment of very low-strength real domestic wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 2019.