

II-1022 – AVALIAÇÃO DE SISTEMA REATOR ANAERÓBIO COM DECANTADOR EXTERNO COMPARADO AO REATOR UASB CONVENCIONAL

Patrícia Beatriz Baréa⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela UFPR (PPGERHA/UFPR). Doutoranda pelo PPGERHA/UFPR.

Tiago Augusto Beuting Ostrowski⁽²⁾

Engenheiro de Bioprocessos e Biotecnologia pela UFPR. Engenheiro de Processos pela Paques Brasil Sistemas para Tratamento de Efluentes.

Fernanda Janaína Oliveira Gomes da Costa⁽³⁾

Pesquisadora da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR). Engenheira de Alimentos pela Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) e Engenheira Química pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). Especialista em Saneamento Ambiental pela Universidade Estadual do Norte do Paraná (UENP), Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela UEPG e Doutora em Engenharia de Alimentos pela UFPR.

Bárbara Zanicotti Leite⁽³⁾

Pesquisadora da SANEPAR. Engenheira de Alimentos pela PUCPR. Especialista em Saneamento Ambiental pela UENP, Mestre em Tecnologia Química pela UFPR e Doutora em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela UFPR (PPGERHA/UFPR).

Miguel Mansur Aisse⁽¹⁾

Doutor em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) e Professor Permanente do PPGERHA/UFPR.

Endereço⁽¹⁾: PPGERHA – UFPR. Centro Politécnico – Bloco V – Primeiro andar – Jd. das Américas – Curitiba – Paraná – CEP: 81.531.990 – Tel: +55 (41) 3361-3144 – E-mail: barea.patricia@gmail.com

RESUMO

O reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) utilizado para o tratamento de efluentes é caracterizado por ser um reator anaeróbio com fluxo ascendente e que incorpora estrutura que possibilita a separação das fases líquida, sólida e gasosa, denominada separador trifásico. Tal dispositivo aumenta o tempo de retenção de sólidos no reator, o que favorece a eficiência de digestão do reator. No entanto, questões relativas à padronização dimensional da estrutura, formação de espuma no interior e perdas de sólidos suspensos voláteis no efluente levam a busca de outras soluções para a questão. Uma alternativa é a utilização de sedimentação de alta taxa externa ao reator. Este trabalho tem como objetivo avaliar a operação de um reator anaeróbio de fluxo ascendente com decantador lamelar externo e comparar com reator UASB convencional. Para isso foi realizado monitoramento, durante 70 dias, em sistema em teste formado por reator combinado da fase anaeróbia e aeróbia com estrutura de decantação externa lamelar, para o tratamento de efluente sanitário. O sistema operou com vazão de 2,8 L/s e tempo de detenção hidráulica (TDH) de 12,8 horas, na fase anaeróbia. A carga orgânica volumétrica (COV) para o período foi de 0,7 kg/m³.d e velocidade ascensional de 0,27 m/h. Como não existe a possibilidade de avaliar o efluente do reator UASB antes da entrada no separador trifásico, foram comparadas as eficiências do efluente do reator UASB com o efluente do decantador lamelar externo. Como resultados obtidos para o período estão as eficiências de remoção de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) com média de 40% e melhor valor de 58%; para a demanda química de oxigênio (DQO) a média de remoção atingiu 24%, com melhor valor de 53%, e por fim, para sólidos suspensos totais (SST) a média de remoção atingiu 25%, com máximo de 72%. Os resultados obtidos durante o período mostraram-se abaixo do esperado quando são comparados com reatores UASB convencionais. No entanto, recomenda-se a continuação do monitoramento os resultados para corroborar a hipótese de que o reator anaeróbio com unidade de decantação lamelar possa substituir os reatores UASB estabelecidos, obtendo eficiências de remoção superiores as da estrutura convencional.

PALAVRAS-CHAVE: Decantação Lamelar, Reator UASB, Sedimentação de Alta Taxa, Tratamento de Efluente Sanitário.

INTRODUÇÃO

O reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) é um reator anaeróbio de fluxo ascendente de alta eficiência para o tratamento de efluentes. O efluente a ser tratado é introduzido e distribuído uniformemente no fundo da estrutura. Assim, o líquido percorre um trajeto ascensional, e passa pela camada de lodo. A espessura (altura) dessa camada, em reatores convencionais, geralmente está entre 1,5 a 2,5 m e essa configuração garante o contato necessário entre o material orgânico e os organismos responsáveis pela digestão dos compostos. Um parâmetro importante para a manutenção da suspensão do manto de lodo e controle de sua saída com o efluente é a velocidade ascensional, que costuma ser mantida tipicamente entre 0,7 a 1 m/h. O efluente tratado e o biogás gerados na digestão seguem em direção ao separador trifásico ou de fases, que é a estrutura responsável pela separação de gases, sólidos e líquido no interior do reator. Assim, o biogás é direcionado à câmara de gás, o efluente tratado é conduzido para a saída do UASB e as eventuais partículas de lodo que se desprenderam da manta retornam à câmara de digestão (LETTINGA, 1995; VAN HAANDEL *et al.*, 2006; SANTOS; CHAVES; VAN HAANDEL, 2016; CHERNICHARO *et al.*, 2018; CAPODAGLIO; OLSSON, 2020).

O separador trifásico além de separar as fases sólida, líquida e gasosa do tratamento anaeróbio também divide o reator em zona de digestão, região inferior, e zona de sedimentação, região superior. Portanto, esse dispositivo é importante na eficiência de digestão do reator, por aumentar o tempo de retenção de sólidos (VAN HAANDEL *et al.*, 2006; YASAR *et al.*, 2007; SANTOS; CHAVES; VAN HAANDEL, 2016; CHERNICHARO *et al.*, 2018).

Pesquisadores relataram melhora na eficiência geral do reator UASB entre 14 a 20% com a utilização do separador de fases (YASAR *et al.*, 2007). Porém, existem várias questões relativas aos separadores trifásicos convencionais que precisam de solução. Dentre elas podem ser citadas a formação de espuma no interior do separador trifásico, as elevadas perdas de sólidos suspensos voláteis no efluente e a ausência de padronização dimensional do dispositivo (FORESTI, ZAIAT e VALLERO, 2006; LOBATO *et al.*, 2018; RIBEIRO *et al.*, 2019).

No entanto, estudos mais recentes constataram a possibilidade da remoção de sólidos suspensos do efluente sem a presença do separador de fases, mas com a incorporação de unidade de sedimentação de alta taxa (CAMPOS; PESSOTTO; BORGES, 2021), semelhante à proposta dessa pesquisa. Alternativas como essas visam o aprimoramento dos modelos de reatores já estabelecidos.

OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a operação de um reator anaeróbio de fluxo ascendente com decantador lamelar externo e comparar com reator UASB convencional.

METODOLOGIA

Descrição do equipamento avaliado

O trabalho avaliou os dados obtidos no monitoramento de um sistema em teste formado por reator combinado de fase anaeróbia e aeróbia, com estrutura de decantação externa, do tipo lamelar, para o tratamento de esgoto sanitário. O sistema piloto (Figura 1) é composto por: uma peneira do tipo estática, com abertura de malha de 1 mm, um reator com formato cilíndrico (6,8 m de diâmetro e 3,5 m de altura) e alimentação igualitária por tubulações localizadas no fundo da estrutura, que possuem aberturas de 2,54 cm (1 polegada) e um decantador lamelar externo com 180 lamelas com inclinação de 55°, volume de 26,6 m³, área superficial de 12,8 m² e taxa de aplicação superficial de 37,5 m³/m².h para vazão de 5,6 L/s.

A estrutura está instalada em Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) na cidade de Curitiba – PR, com capacidade de tratamento de 1.680 L/s. O sistema foi alimentado por uma fração do esgoto afluyente à ETE, já gradeado e desarenado.

O sistema foi inoculado com lodo de reator UASB utilizado para tratamento de esgoto sanitário em dezembro de 2019. Durante a avaliação de 70 dias, o sistema (fase anaeróbia) operou com vazão de 2,8 L/s (esgoto equivalente a uma população de 1.200 habitantes) e tempo de detenção hidráulica (TDH) de 12,8 horas. O processo do sistema piloto se inicia no peneiramento do afluyente, que em seguida alimenta a fase anaeróbia do sistema. Assim, a saída do tratamento anaeróbio é direcionada ao decantador lamelar externo para a separação de fases líquida e sólida, a primeira é direcionada ao pós-tratamento, fase de lodos ativados do reator, que não será objeto desse trabalho, e a parcela sólida pode retornar ao reator anaeróbio ou ser descartada em tubulação que encaminha para a entrada da ETE. Periodicamente ocorriam descartes de lodo, diretamente de dentro do reator, a fim de controlar a massa de lodo no manto.

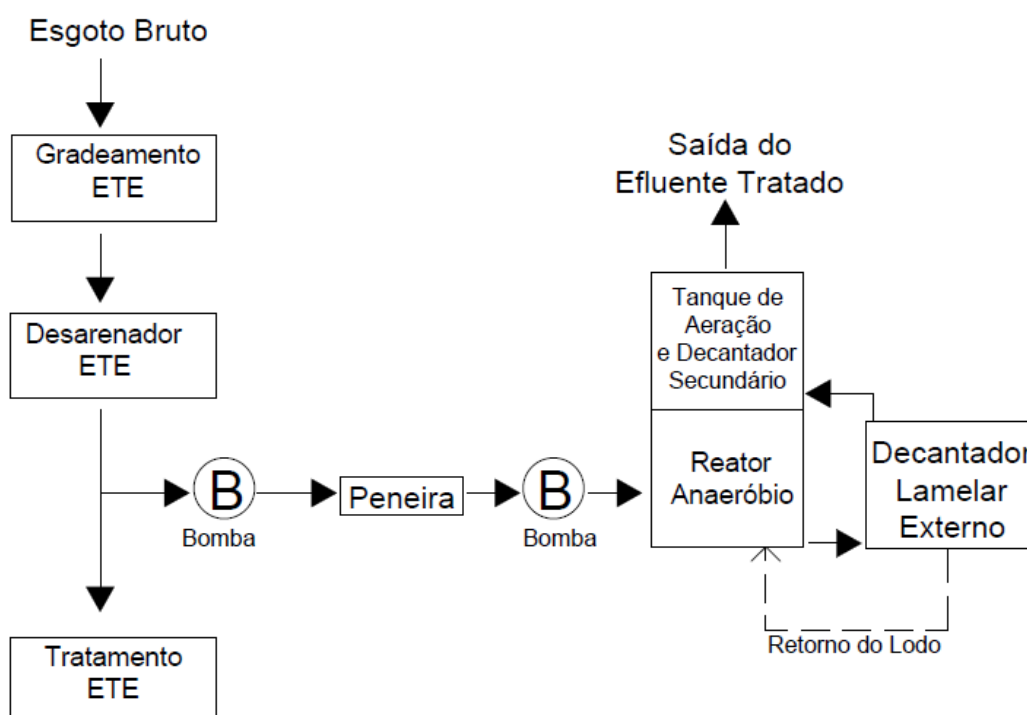


Figura 1: Fluxograma do sistema em teste

FONTE: Adaptado de BARÉA (2020)

Dados Monitorados

Os dados monitorados foram demanda química de oxigênio (DQO), sólidos suspensos totais (SST) no efluente da peneira estática, na saída do reator anaeróbio (manto de lodo) e na saída da fase líquida do decantador lamelar externo. O parâmetro demanda bioquímica de oxigênio (DBO) foi avaliado em todas as unidades citadas anteriormente, com exceção do efluente do reator anaeróbio. Foram realizadas duas coletas por semana, de maneira pontual, aproximadamente às 10h. Também foi avaliada a concentração de sólidos totais (ST) no manto de lodo do reator anaeróbio. As análises foram realizadas de acordo com *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A primeira avaliação no sistema foi relacionada à carga aplicada, a velocidade ascensional e a carga orgânica volumétrica (COV). A carga aplicada no reator anaeróbio, calculada a partir das concentrações de DQO no período avaliado, resultou em 90,24 kg/d. Já para o cálculo da COV, foi considerado o volume da fase anaeróbia do reator (128 m³), o valor obtido foi de 0,7 kg/m³.d, próximo ao encontrado por Hoyos *et al.* (2019), que obtiveram valor médio de 0,61 kg DQO/m³.d, no entanto abaixo do valor relatado por Chernicharo *et al.* (2015), que citam valores entre 2 a 3,5 kgDQO/m³.d para esgoto doméstico.

A velocidade ascensional durante o período avaliado esteve em 0,27 m/h, abaixo do limite recomendado pela Norma Brasileira, 0,7 m/h, (ABNT, 2011) e também de citações de outros pesquisadores, que relatam a faixa de 0,5 a 1,0 m/h (LIM; KIM, 2014).

Monitoramento DBO, DQO e SST nas estruturas avaliadas

No reator UASB convencional o efluente de saída é o esgoto tratado que passou pelo separador trifásico e, normalmente em sistemas operacionais ou estudos, não há avaliação do efluente antes de adentrar ao separador trifásico. Dessa forma, a comparação entre afluente do separador trifásico do UASB convencional e do piloto não foi realizada. No sistema avaliado nesse estudo foram obtidos dados tanto do efluente do reator, sem passar por nenhuma estrutura com função de separação de fases, quanto do efluente do decantador lamelar externo.

O parâmetro DBO foi avaliado no efluente da peneira e no efluente do decantador externo, que pode ser comparado como a saída de um reator UASB convencional. As concentrações efluentes da peneira e do decantador lamelar externo se mantiveram nas faixas de 105 a 290 mg/L e 80 a 145 mg/L, respectivamente com médias 211 mg/L para o primeiro ponto avaliado e 118 mg/L para o segundo. Para todas as coletas, observa-se eficiência de remoção de DBO para o conjunto reator anaeróbio e decantador externo, chegando a média de 40%, com valor máximo de 58% (Figura 2).

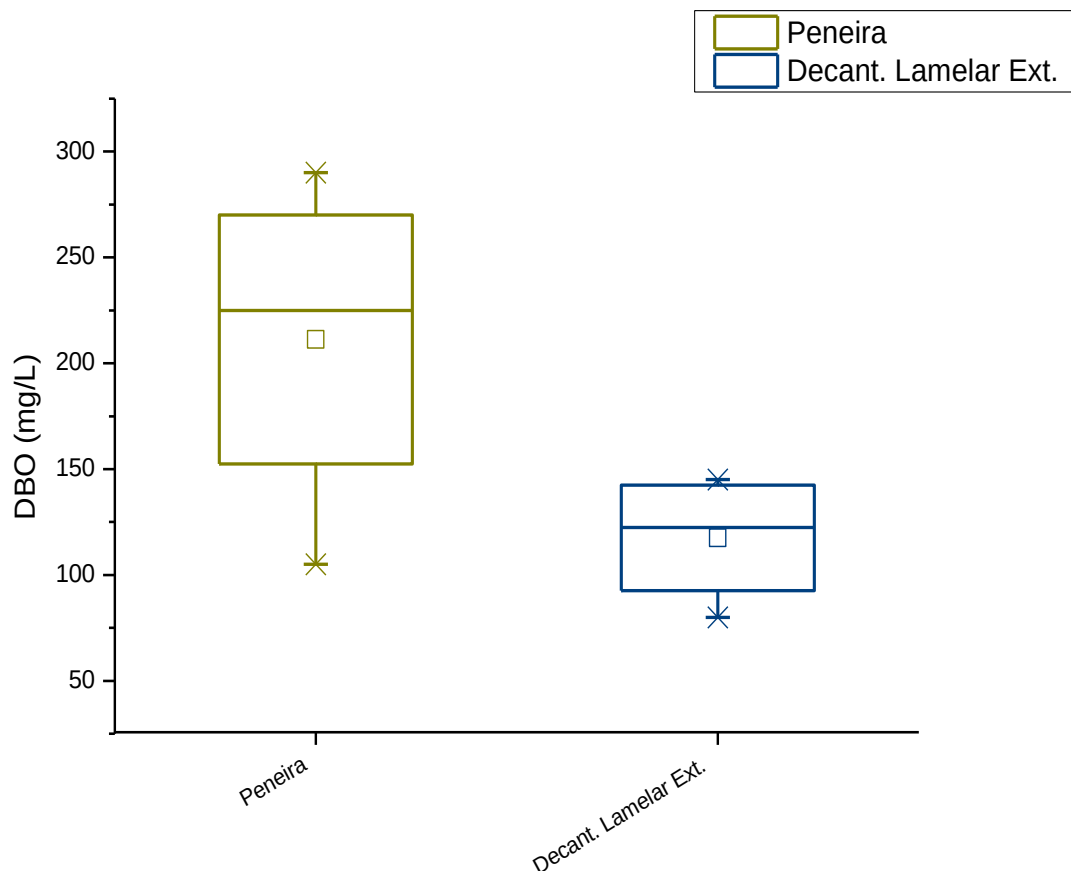


Figura 2: Variação de concentração efluente no parâmetro DBO nos pontos avaliados

Quando é realizada a comparação com reatores UASB convencionais, o valor médio está dentro da faixa relatada por Hoyos *et al.* (2019), com $25 \pm 17\%$ no inverno, e $53 \pm 21\%$ no verão, porém abaixo do estudo de Chernicharo *et al.* (2015), que em levantamento sobre essas unidades operando em escala plena, observaram eficiência média de remoção de 72%, com variação de 65 a 84%. Por sua vez, Neves (2020) relatou valores de 55 e 75% de remoção em fase de inoculação e operação de reator UASB, respectivamente.

Com relação à concentração de DQO, verificou-se que as concentrações do efluente do decantador externo foram inferiores em 80% das coletas do que as de entrada do sistema (efluente da peneira) e em 100% das coletas quando comparadas ao efluente do reator anaeróbico (manto de lodo). Dessa maneira, em 88% das coletas as concentrações do efluente do reator anaeróbico são as maiores dos pontos avaliados. Essa constatação pode ter relação com a ausência do separador de fases interno, que não limita a expansão do manto de lodo, permitindo que o lodo seja eliminado junto com o efluente dessa estrutura. A Figura 3 apresenta dados das concentrações efluentes dos pontos analisados. A concentração média da peneira foi de 376 mg/L, com variação na faixa de 162 a 595 mg/L. Para o efluente do reator anaeróbico, os valores permaneceram na faixa de 273 a 1594 mg/L, com média de 832 mg/L. Por fim, para o efluente do decantador lamelar externo, a faixa de variação foi de 172 a 322 mg/L, com média de 257 mg/L.

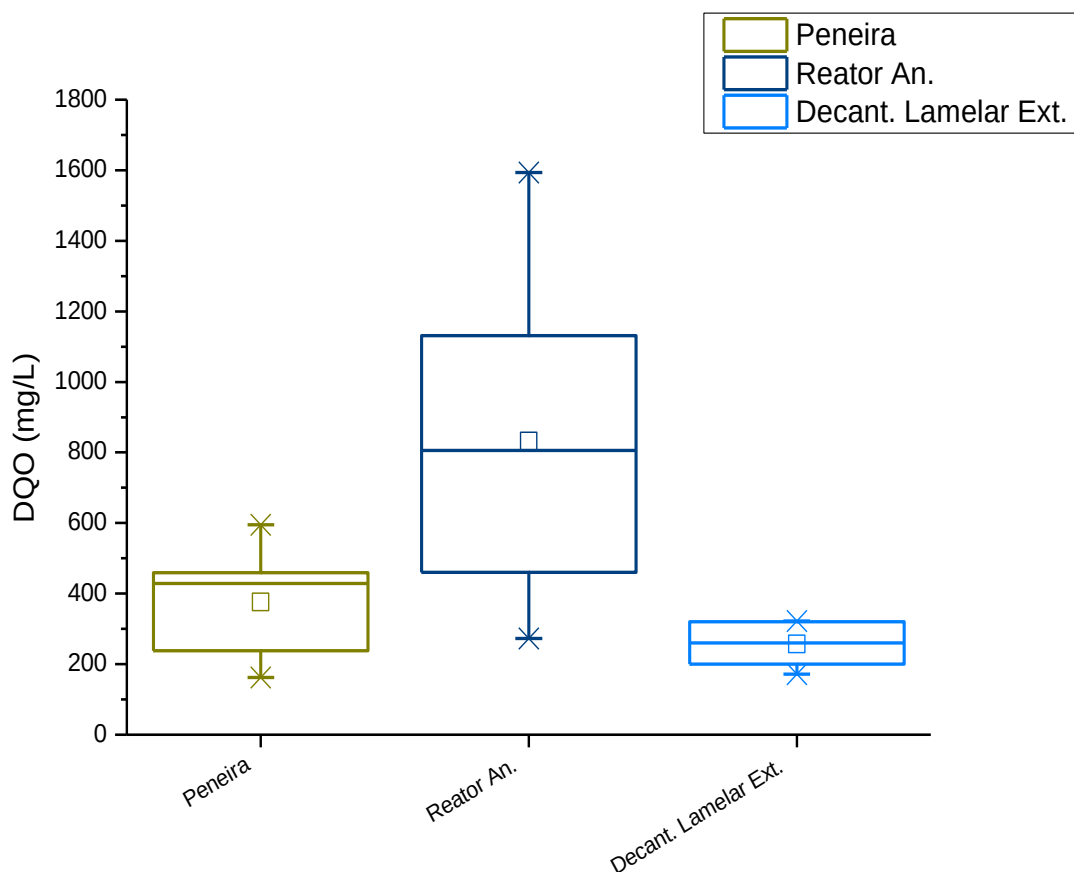


Figura 3: Variação de concentração efluente no parâmetro DQO em cada ponto avaliado

A eficiência global do sistema tem valores positivos em 75% das coletas realizadas, funcionando assim, como uma barreira de retenção do manto de lodo que escapa junto com o efluente do reator anaeróbico. A eficiência média de remoção de DQO foi de 24%, com o melhor valor de 53%. Esses valores são inferiores aos obtidos por diversos pesquisadores. Chernicharo *et al.* (2015) citaram o valor de 66% para a média de remoção em reatores UASB convencionais, com variação entre 58 a 79%, valores acima da faixa obtida nesse estudo. O estudo de Hoyos *et al.* (2019) obteve eficiência média máxima de remoção de DQO no verão de $74 \pm 9,8\%$, com variação entre $67 \pm 10\%$ e $54 \pm 10\%$ para primavera e inverno, valores acima daqueles encontrados nesse

estudo. Cecconet, Callegari e Capodaglio (2022) obtiveram remoção média de 66,4% para reator operando com TDH próximo ao dessa pesquisa e temperatura de 25°C.

A Figura 4 apresenta a variação de concentração para o parâmetro SST. Em 100% das coletas realizadas, a concentração de SST no efluente do reator anaeróbio foi superior aos demais pontos avaliados, como esperado, pela ausência de separador interno. A concentração média da peneira foi de 309 mg/L, com variação na faixa de 91 a 649 mg/L. Para o efluente do reator anaeróbio, os valores permaneceram na faixa de 309 a 1770 mg/L, com média de 985 mg/L. Por fim, para o efluente do decantador lamelar externo, a faixa de variação foi de 112 a 203 mg/L, com média de 160 mg/L.

O sistema atingiu o valor máximo de eficiência de 72%, com média de remoção em 25%. Esse valor é menor que o obtido por Hoyos *et al.* (2019) que relataram $65 \pm 19\%$, porém próximo do valor obtido por Cecconet, Callegari e Capodaglio (2022), que informaram média de 27%. O valor máximo esteve próximo do descrito no estudo de Neves (2020) que obteve 74 e 82 % para diferentes fases de sua pesquisa. Quando é analisado apenas o desempenho do decantador lamelar externo, a unidade remove de 64 a 91%, um pouco abaixo do relatado por Campos, Pessotto e Borges (2021), que relataram a faixa de 89,4 a 97% de remoção, para unidade semelhante à proposta.

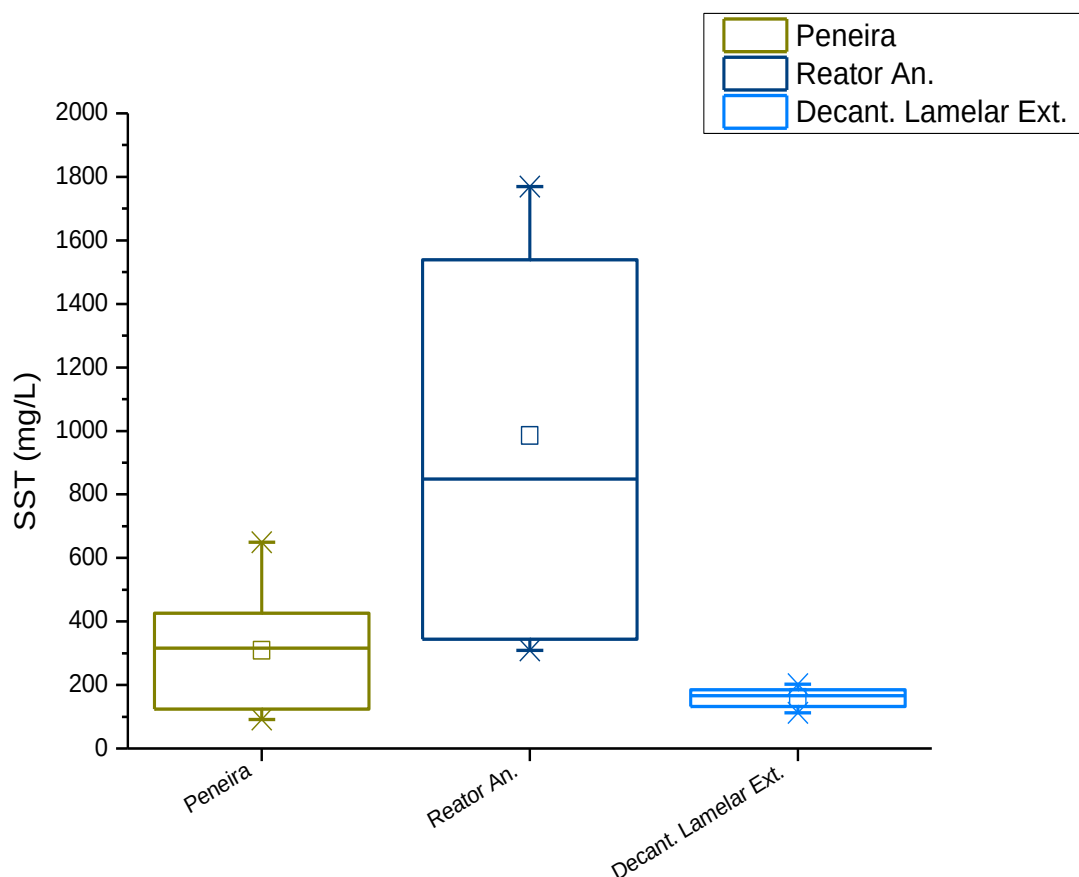


Figura 4: Variação de concentração efluente no parâmetro SST em cada ponto avaliado

Avaliação do manto de lodo do reator anaeróbio

Por fim, também foi avaliada a concentração de ST ao longo da profundidade do reator anaeróbio. O que pode ser observado na Figura 5 é uma tendência de maiores concentrações localizadas na menor altura de coleta (0,1 m) e a ocorrência da manutenção de concentrações mais elevadas até uma determinada altura, nesse caso altura do ponto de coleta de 2,4 m. Também é visível a diminuição das concentrações no ponto de coleta mais elevado (3,1 m), possivelmente por estar próxima a saída do efluente do reator anaeróbio e corrobora com a DQO elevada no efluente da fase aeróbia.

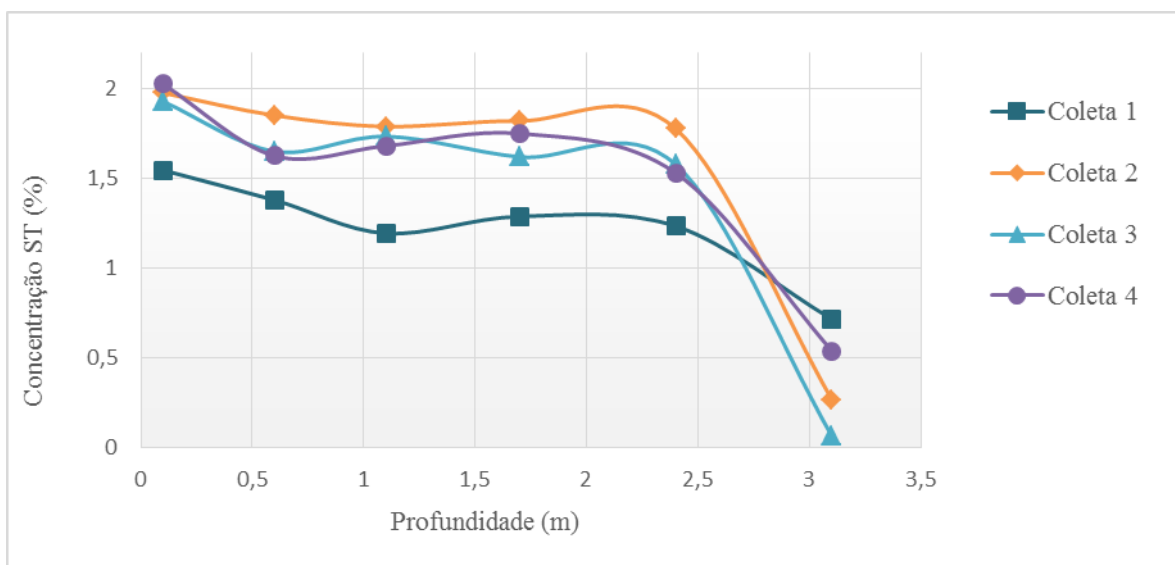


Figura 5: Variação das concentrações de ST ao longo das alturas do manto de lodo

Quando são analisadas as médias de concentrações, apresentadas na Figura 6, observa-se a maior concentração na altura inferior (0,1 m) acima de 18.000 mg/L e concentrações muito próximas nos pontos de coleta intermediários (0,6 m a 2,4 m), entre 14.000 a pouco mais de 16.000 mg/L. Porém, na altura superior (3,1 m), a concentração média tem uma drástica redução, ficando abaixo de 0,5% (5.000 mg/L). O trabalho de Hoyos et al. (2019) observou comportamento diferente nas concentrações do manto de lodo de reatores UASB convencionais. Obteve-se concentrações de 36.385 mg/L no ponto inferior de coleta (0,5 m) e 14.462 mg/L no ponto correspondente ao topo da zona de digestão (3,0 m).

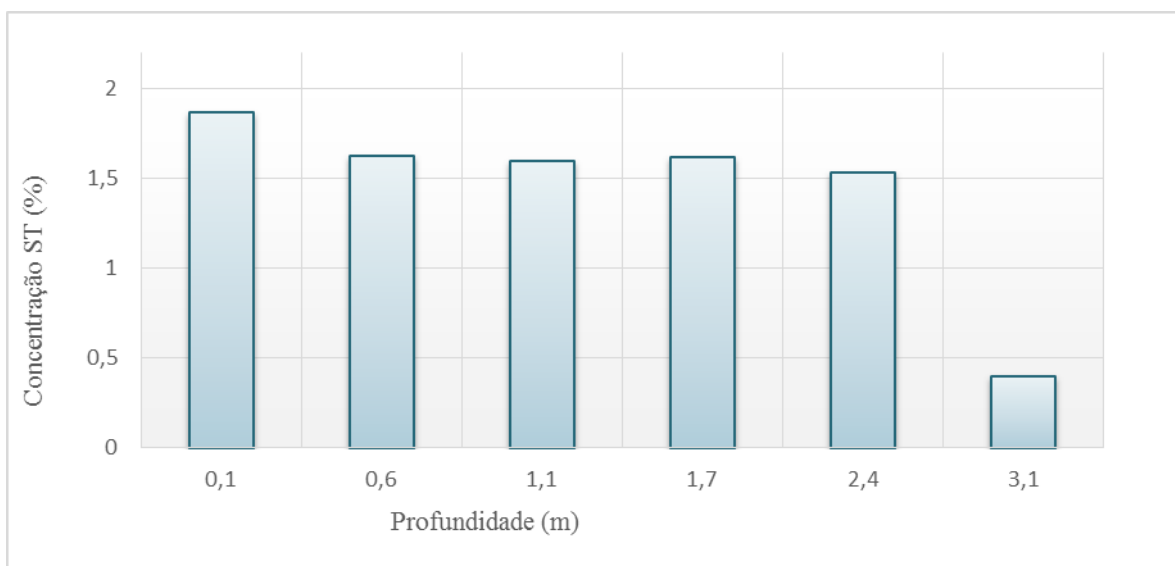


Figura 6: Concentração média nas alturas de coleta do manto de lodo durante o monitoramento

Para um reator UASB esperam-se teores de sólidos, no manto de lodo, com variação de 3 a 5% (JORDÃO; PESSÔA, 2011). Uma observação de Lobato *et al.* (2018) é a limitação do teor de sólidos nas alturas mais elevadas de reatores anaeróbios, que não deve ultrapassar o limite de 0,5% (5.000 mg/L), para evitar o arraste de sólidos junto com o efluente do reator. Apesar de ter sido realizado o descarte constante de lodo do reator anaeróbio durante essa pesquisa, com frequência média de duas vezes na semana, manteve-se um padrão de concentração no manto de lodo, o que pode indicar que ocorreu o arraste de lodo.

Avaliação do decantador lamelar externo

Neste arranjo de tratamento a estrutura para a separação de fases do reator UASB, tradicionalmente um separador trifásico de formato prismático triangular invertido, foi substituída por um decantador lamelar instalado externamente ao reator. Alguns parâmetros adotados em outros projetos foram apresentados na Tabela 1, bem como os valores adotados no sistema em estudo.

Tabela 1: Parâmetros de Projeto empregados no dimensionamento de Decantadores Lamelares em ETEs

Local de aplicação e/ou citação	Taxa de aplicação $m^3/m^2.d$	Outros		Fonte
		L do duto ou canal (m)	Ângulo (°)	
NBR 12.209/2011 ¹	80	1 a 1,2	entre 55 a 70	ABNT
ETE Atuba	80	–	–	Comunicação pessoal
Cascavel - PR ²	28,8	1,2	60	Comunicação pessoal
Sistema em teste	37,5	1,3	55	Baréa, 2020

Nota: ¹ Para processos biológicos com biofilme;

² Dimensionado para o pós-tratamento de flotadores.

Como pode ser observado na Tabela 1, as dimensões do comprimento do duto ou canal e o ângulo das lamelas do sistema em teste têm valores próximos daqueles adotados em outros projetos. Porém, a taxa de aplicação é mais baixa, o que pode ser justificado pela função que essa unidade desempenha no sistema estudado, de substituir um separador trifásico convencional, que usualmente é projetado com taxa de aplicação inferior ao de uma unidade de decantação convencional. A recomendação da NBR 12.209 (ABNT, 2011) para o projeto desse dispositivo é a adoção de taxa de aplicação hidráulica menor ou igual $1,2 m^3/m^2.h$ para a vazão máxima. Dessa maneira, ao utilizar dispositivo com taxa de aplicação superior, e com previsão de alteração das vazões, são esperados resultados promissores com o aprofundamento do monitoramento.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho avaliou a operação de um reator anaeróbio de fluxo ascendente sem estrutura interna para separação de fases, porém com decantador lamelar externo. Durante a avaliação do sistema, a COV aplicada no reator anaeróbio foi de $0,7 kgDQO/m^3.d$, observando-se as eficiências de remoção média de 40%, com valor máximo de 58% para DBO, de 24%, com melhor valor de 53% para DQO e de 25% com valor máximo de 72% para SST.

Os resultados obtidos até o momento para o sistema em teste reator anaeróbio e decantador lamelar externo demonstram prejuízo nas eficiências de remoção para os parâmetros analisados, quando comparados com outros estudos que avaliam reatores UASB convencionais. No entanto, por se tratar de dados preliminares é esperado que os resultados obtidos ao final do monitoramento dessas unidades possam confirmar a hipótese de que o reator anaeróbio, com unidade de decantação lamelar possa ser um substituto para reatores UASB estabelecidos, obtendo eficiências de remoção próximas ou até melhores que as esperadas para o arranjo convencional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a SANEPAR (Companhia de Saneamento do Paraná) e o PPGERHA/UFPR, pela participação e execução deste estudo, a Paques Brasil Sistemas para Tratamento de Efluentes pelo apoio durante esta pesquisa e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela cessão de Bolsa de Doutorado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA; AWWA; WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. New York: 21th Ed. 2012.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR-12.209. Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. 2ª Ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
3. BARÉA, P. B. Avaliação de um sistema integrado reator anaeróbio de manto de lodo e processo de lodos ativados tratando esgoto sanitário. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.
4. CAMPOS, J.R.; PESSOTTO, B.; BORGES, N.B. Novas concepções para reatores anaeróbios de manta de lodo: uso de mistura mecânica ou hidráulica com decantação lamelar e sem separador trifásico. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.26, n.6, p.1097-1109,2021.
5. CAPODAGLIO, A.G.; OLSSON, G. Energy issues in sustainable urban wastewater management: use, demand reduction and recovery in the urban water cycle. Sustainability, v.12, n.266, p.1-17, 2020.
6. CECCONET, D.; CALLEGARI, A.; CAPODAGLIO, A.G. UASB performance and perspectives in urban wastewater treatment at sub-mesophilic operating temperature. Water, v. 14, n.115, p. 1-13, 2022.
7. CHERNICHARO, C.A.L.; van LIER, J.B.; NOYOLA, A.; BRESSANI RIBEIRO, T. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. Environmental Science Biotechnology. v.14, n.4, p. 649-679, 2015.
8. CHERNICHARO, C.A.L.; RIBEIRO, T.B.; PEGORINI, E.S.; POSSETTI, G.R.C.; MIKI, M.K.; SOUZA, S.N. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 1: Tópicos de Interesse. Revista DAE, v.66, p. 5 – 16, 2018.
9. FORESTI, E.; ZAIAT, M.; VALLERO, M. Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives and challenges. Reviews in Environmental Science and BioTechnology. p. 3-19, 2006.
10. HOYOS, N.L.M.; BARROSO JUNIOR, J.C.; LEAL, F.K.; BARRANTES, E.F.G.; MONTEGGIA, L.O. Proposta de nova configuração de reator anaeróbio híbrido aplicado ao tratamento de esgoto sanitário. Revista DAE. v.67, p.73 – 88, 2019.
11. JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. Tratamento de esgotos domésticos. 6. ed. ABES, Rio de Janeiro, 2011.
12. LETTINGA, G. Anaerobic digestion and wastewater treatment systems. Antonie van Leeuwenhoek, v. 67, p. 3-28, 1995.
13. LIM, S.J.; KIM, T.H. Applicability and trends of anaerobic granular sludge treatment process. Biomass & Bioenergy, v.60, p. 189-202, 2014.
14. LOBATO, L.C.S.; RIBEIRO, T.B.; SILVA, B.S.; NEVES, P.N.P.; CHERNICHARO, C.A.L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 3: Gerenciamento de lodo e espuma. Revista DAE, v.66, p. 30 – 55, 2018.
15. NEVES, P.N.P. Contribuição para o aprimoramento de reator UASB aplicado ao tratamento de esgoto sanitário: inoculação e controle da manta de lodo. 2020. 87 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2020.
16. RIBEIRO, T.B.; EMRICH, A.L.; SANTOS, J.M.B.; POAGUE, K.I.H.M.; CHERNICHARO, C.A.L. Desenvolvimento de separadores trifásicos modulares para reatores UASB tratando esgoto sanitário. 30º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente. 2019, São Paulo. Anais ... AESABESP: 2019.
17. SANTOS, S.L.; CHAVES, S.R.M.; VAN HAANDEL, A. Influence of phase separator design on the performance of UASB reactors treating municipal wastewater. Water SA, v. 42. n. 2, p. 176-182, 2016.
18. SANTOS, S.L.; CHAVES, S.R.M.; VAN HAANDEL, A. Influence of phase separator design on the performance of UASB reactors treating municipal wastewater. Water SA, v. 42. n. 2, p. 176-182, 2016.
19. VAN HAANDEL, A.; KATO, M.T.; CAVALCANTI, P.F.F.; FLORENCIO, L. Anaerobic reactor desing concepts for the treatment of domestic wastewater. Reviews in Environmental Science and BioTechnology, p. 21-38, 2006.