BRUNO MARTINS DE CAMARGO

**COMPORTAMENTO DE REATOR UASB SEM SEPARADOR
TRIFÁSICO NO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO**

São Paulo

2016

2016

BRUNO MARTINS DE CAMARGO

**COMPORTAMENTO DE REATOR UASB SEM SEPARADOR TRIFÁSICO NO
TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil

Área de Concentração: Engenharia Hidráulica

Orientador: Professor Roque Passos Piveli

São Paulo

2016

2016

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 14 de outubro de 2016

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catlogação-na-publicação

Camargo, Bruno Martins de

Comportamento de Reator UASB sem Separador Trifásico no
Tratamento de Esgoto Sanitário / B. M. Camargo – versão corr. -- São Paulo, 2016.
70 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental.

1.TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS 2.REATORES
ANAERÓBIOS I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia de Hidráulica e Ambiental II.t.

Como é feliz o homem que acha a sabedoria, o homem que obtém entendimento, pois a sabedoria é mais proveitosa do que a prata e rende mais do que o ouro. É mais preciosa do que rubis; nada do que você possa desejar se compara a ela.

Na mão direita, a sabedoria lhe garante vida longa; na mão esquerda, riquezas e honra.

Os caminhos da sabedoria são caminhos agradáveis, e todas as suas veredas são paz.

A sabedoria é árvore que dá vida a quem a abraça; quem a ela se apegar será abençoado.

(Provérbios 3:13-18)

Dedicatória

Às pessoas mais importantes de minha vida,
que sempre me incentivaram e me
apoiaram: minha esposa Rebeca, meus pais
Antônio e Guaraciaba e Deus, que sustenta
a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Deixo os meus mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho e para o meu crescimento neste período, em especial:

À Rebeca, minha esposa, que um dia conquistou meu coração e que, desde então, tem sido a contínua fonte de inspiração em minha vida.

Aos meus pais, que sempre me incentivaram nos estudos e que se doaram integralmente para que eu e meus irmãos pudéssemos conquistar nossos sonhos.

Aos meus irmãos, que nesses últimos anos tornaram-se também meus amigos, por todo o apoio e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Roque Passos Piveli, meu orientador, que, com muita paciência, confiou a mim essa pesquisa e me instruiu em muitos momentos. Obrigado por toda a paciência e dedicação e por todo o ensinamento que pude absorver ao longo desses anos.

Ao Prof. Dr. Pedro Além Sobrinho, pelo apoio e pelos conselhos na fase final da elaboração da dissertação.

Aos profissionais do Laboratório de Saneamento, Fábio e Laerte, que me auxiliaram incontáveis vezes na realização dos ensaios laboratoriais e no cuidado e manutenção do reator piloto.

À Encibra, que possibilitou a realização deste mestrado concomitantemente aos trabalhos da empresa. Em especial, agradeço aos profissionais: Engº Sérgio Abreu, Engº Eduardo Colzi, Engº Antônio Roberto Lopes, Jorge Almeida, Marizilda, Engº Rafael Hinnah, Engº Bruno Fukasawa, Engº Rômulo Santos, Engº Rondon Salazar, Engº Marcos Jardim e Engª Micheli Ribeiro, que estiveram ao meu lado sempre.

Por fim, a Deus, que me capacitou mais uma vez e continuamente tem honrado a minha vida e me guiado. A Ele eu devo toda a honra, toda a glória e todo o louvor.

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi a avaliação das características operacionais de um reator UASB sem o dispositivo de coleta de gás (separador trifásico) e sem o anteparo retentor de espuma posicionado próximo à canaleta de coleta do efluente. A motivação para esta pesquisa foi o interesse manifestado pelas companhias de saneamento em aplicar esta simplificação, que poderá implicar em economia na implantação dos reatores e praticamente na eliminação da necessidade de remoção de espuma. Utilizou-se um reator UASB com tais simplificações com volume útil de 24,5 m³ e estabeleceu-se uma estratégia operacional com aumento gradual da vazão de alimentação, compondo quatro fases de operação, com tempos de retenção hidráulica respectivamente de 16, 12, 10 e 8 horas. As vazões foram mantidas constantes em cada fase, com exceção da última, em que se impôs dois picos de vazão ao longo do dia. O reator manteve-se operando com eficiências médias de remoção de DQO total, respectivamente, de 65,9%, 60,3%, 48,7% e 15,0%. De modo geral, pode-se afirmar que o reator piloto não apresentou o desempenho esperado, em termos de remoção de matéria orgânica, para TDH de 8 horas. Quanto ao perfil de sólidos no manto de lodo, nas duas primeiras etapas (TDH de 16 e 12 horas), o teor de sólidos daquele foi elevado, mas reduziu-se drasticamente a partir da etapa com TDH de 10 horas. Na última etapa, o comportamento da manta de lodo foi pouco previsível, observando-se progressivo arraste de sólidos do reator. Em função da grande perda de sólidos, acredita-se que o artifício empregado possa ser utilizado com melhor desempenho com a implantação de um decantador a jusante do reator ou mediante a aplicação de um pós-tratamento que garanta a recuperação dos sólidos perdidos (por exemplo, lodos ativados). Outra alternativa é a própria substituição do UASB pelo decantador primário antes de um pós-tratamento aeróbio.

Palavras-chave: Digestão anaeróbia, Manta de Lodo, Reator UASB, Separador Trifásico, Tratamento de Esgoto.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the operational characteristics of a UASB reactor without the gas collection device (three phase separator) and without the scum retainer screen positioned near the effluent collection channel. The motivation for this research was the interest shown by sanitation companies to apply this simplification, which can result in savings in the implementation of the reactors and practically in eliminating the need of scum removal. An UASB reactor was used with such simplifications with a volume of 24.5 m³ and an operational strategy was established with gradual increase of the feed flow, consisting of four operating phases, with hydraulic retention times, respectively, of 16, 12, 10 and 8 hours. The flows were kept constants at each operating phase, except the last, which was imposed two peak flows throughout the day. The reactor was kept operating with efficiency of COD removal, respectively, of 65.9%, 60.3%, 48.7% and 15,0%. Generally, the pilot reactor had not the expected performance in removal of organic matter, with hydraulic retention time of 8 hours. In the first two fases (HDT of 16 and 12 hours), solid's content in sludge blanket was high, but had reduced significantly from the second fase, with 10 hours of HDT. In the last fase, the sludge blanket behavior was bit predictable, with progressive drag of solids from reactor. Because of high solids loss, it is believed that the applied device can be used with better performance with the implantation of a settler after the reactor or a post-treatment that ensures the lost solids recovery (for example, activated sludge). Another alternative is the replacement of UASB by the primary clarifier before aerobic post-treatment.

Keywords: Anaerobic Digestion, Sludge Blanket, UASB reactor, Three Phase Separator, Sewage Treatment.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CRUSP – Conjunto Residencial da Universidade de São Paulo

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

FCTH – Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

RALF – Reator Anaeróbio de Lodo Fluidizado

SANASA – Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná

SNIS – Sistema Nacional de Informações de Saneamento

SST – Sólidos Suspensos Totais

TDH – Tempo de detenção hidráulica

UASB – Reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente

USP – Universidade de São Paulo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Configuração do Reator UASB (Jordão & Pessôa, 2011).....	8
Figura 2. Rotas de Conversão de DQO e Fluxos de Metano em Reatores UASB. Fonte: Lobato (2014).	15
Figura 3. Escuma nas Zonas de Decantação da ETE São Jorge – Paraná (Fonte: ENCIBRA S/A).	17
Figura 4. Acúmulo de Escuma Próximo ao Anteparo – ETE São Jorge, Paraná (Fonte: ENCIBRA S/A).	17
Figura 5. Escuma nas Zonas de Decantação da ETE CIC Xisto, Paraná (Fonte: ENCIBRA S/A).	18
Figura 6. Acúmulo de Escuma Espessa em Zona de Decantação e Crescimento de Plantas – ETE CIC Xisto, Paraná (Fonte: ENCIBRA S/A).	18
Figura 7. Escuma Espessa em UASB da ETE CIC Xisto – Paraná (Fonte: ENCIBRA S/A).	18
Figura 8. Escuma Espessa em UASB e Anteparo com Deflexão – ETE CIC Xisto, Paraná (Fonte: ENCIBRA S/A).....	18
Figura 9. Escuma Acumulada em UASB Circular (RALF) da ETE Oeste, em Cascavel – PR (Fonte: ENCIBRA S/A).....	19
Figura 10. Escuma Acumulada em Zona de Decantação da ETE Santa Quitéria – Paraná (Fonte: ENCIBRA S/A).....	19
Figura 11. BIOTHANE UASB®. e BIOPAQ UASB®. Fonte: Biothane Corporation (2014); Adaptado de Veolia Water Systems (2014).	28
Figura 12. Vista Superior da ETE Lageado, em Botucatu – SP.	29
Figura 13. Perfil de Sólidos Sedimentáveis no Efluente dos RALFs, no Mês de Março/2014, na ETE Lageado, em Botucatu (Fonte: SABESP).	31
Figura 14. Desenho Esquemático do Sistema de Tratamento de Esgoto Piloto.....	33
Figura 15. Vista superior do reator, com as calhas de coleta de efluente e sem o separador trifásico (Fonte: Próprio Autor).	33

Figura 16. Tubulações de amostragem de lodo (Fonte: Próprio Autor).	33
Figura 17. Tratamento Preliminar (Fonte: Próprio Autor).	34
Figura 18. EE de Esgoto Bruto (Fonte: Próprio Autor).	34
Figura 19. Estrutura de Entrada no Reator (Fonte: Próprio Autor).	34
Figura 20. Tubulação de Entrada (Fonte: Próprio Autor).	35
Figura 21. By-Pass do Reator e Tubulação de Entrada (Fonte: Próprio Autor).	35
Figura 22. Estrutura Metálica Onde se Apoiava Anteriormente o Separador Trifásico (Fonte: Próprio Autor).	36
Figura 23. Canaletas de Coleta do Efluente (4, no Total) e Canal de Saída (Periférico) (Fonte: Próprio Autor).	36
Figura 24. Canaletas de Coleta do Efluente sem Retentores de Escuma (Fonte: Próprio Autor).	36
Figura 25. Caminhão com 8 m ³ de Lodo de UASB.	37
Figura 26. Carregamento do Reator com Lodo de UASB.	37
Figura 27. Regime de Vazões de Aplicado ao Reator na Fase 4.	38
Figura 28. Tubulações de Amostragem de Lodo do Reator UASB.	41
Figura 29. Séries históricas do teor de sólidos ao longo da altura do manto de lodo – Fases 1, 2 e 3.	44
Figura 30. Séries históricas do teor de sólidos ao longo da altura do manto de lodo - Fase 4 (Horário da Coleta – 18:00).	47
Figura 31. Séries históricas do teor de sólidos ao longo da altura do manto de lodo - Fase 4 (Horário de Coleta – 20:00).	47
Figura 32. Diagramas Box-Whiskers da Relação SV/ST do Lodo, ao Longo da Altura do Reator.	52
Figura 33. Escuma Visualizada na Superfície do Reator (Fonte: Próprio Autor).	53
Figura 34. Perfil do Valor Médio de pH no Esgoto Bruto (Amostras da Coleta Automática).	54

Figura 35. Perfil do Valor Médio de Alcalinidade no Esgoto Bruto (Amostras da Coleta Automática).	55
Figura 36. Perfil do Valor Médio de DQO no Esgoto Bruto (Amostras da Coleta Automática).	56
Figura 37. Diagramas Box-Whiskers de pH.	59
Figura 38. Diagramas Box-Whiskers de Alcalinidade.....	60
Figura 39. Box-Whiskers de Ácidos Orgânicos Voláteis.	61
Figura 40. Diagramas Box-Whiskers de DQO do Esgoto Bruto e dos Efluentes Tratado e Filtrado.....	62
Figura 41. Perfil de Sólidos Sedimentáveis no Esgoto Bruto e no Efluente Final do Reator UASB.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Vantagens e Desvantagens dos Sistemas Anaeróbios. Fonte: Adaptada de Chernicharo (2007).	5
Tabela 2. Resultados Operacionais de $DBO_{5,20}$ da ETE Lageado, em Botucatu (Fonte: SABESP).	30
Tabela 3. Fases operacionais estabelecidas.	37
Tabela 4. Variáveis monitoradas, pontos de amostragem e frequência das análises – Fases 1, 2 e 3.	39
Tabela 5. Variáveis monitoradas, pontos de amostragem e frequência das análises – Fase 4.	40
Tabela 6. Teor de sólidos (%) no lodo ao longo da altura do reator UASB – Fases 1, 2 e 3.	43
Tabela 7. Teor de sólidos (%) no lodo ao longo da altura do reator UASB – Fases 4 (Horário de Coleta – 18:00).	45
Tabela 8. Teor de sólidos (%) no lodo ao longo da altura do reator UASB – Fase 4 (Horário de Coleta – 20:00).	46
Tabela 9. Teor de sólidos voláteis (%) no lodo ao longo da altura do reator UASB – Fases 4 (18:00).	48
Tabela 10. Teor de sólidos voláteis (%) no lodo ao longo da altura do reator UASB – Fases 4 (20:00).	49
Tabela 11. Relação SV/ST no lodo ao longo da altura do reator UASB – Fase 4 (18:00).	50
Tabela 12. Relação SV/ST no lodo ao longo da altura do reator UASB – Fase 4 (20:00).	51
Tabela 13. pH no Esgoto Bruto (Amostras da Coleta Automática).	54
Tabela 14. Alcalinidade no Esgoto Bruto (Amostras da Coleta Automática).	55
Tabela 15. DQO no Esgoto Bruto (Amostras da Coleta Automática).	56
Tabela 16. Resumo estatístico dos resultados de pH, Alcalinidade, AOV e DQO para Tempo de Detenção Hidráulica de 16 horas.	58

Tabela 17. Resumo estatístico dos resultados de pH, Alcalinidade, AOV e DQO para Tempo de Detenção Hidráulica de 12 horas.....	58
Tabela 18. Resumo estatístico dos resultados de pH, Alcalinidade, AOV e DQO para Tempo de Detenção Hidráulica de 10 horas.....	58
Tabela 19. Resumo estatístico dos resultados de pH, Alcalinidade, AOV e DQO para Tempo de Detenção Hidráulica de 8 horas.	59

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	13
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo Geral	3
2.2. Objetivos Específicos.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Reatores Anaeróbios no Tratamento de Esgotos Domésticos.....	4
3.2. Princípios do Funcionamento dos Reatores UASB	5
3.3. Condições Operacionais.....	8
3.3.1. TDH e Velocidade Ascensional	9
3.3.2. Tratamento Preliminar.....	11
3.4. Dificuldades Práticas na Operação de Reatores UASB	13
3.4.1. Construção da Estrutura do Separador Trifásico	13
3.4.2. Perdas de Biogás por Diluição no Efluente e Liberação na Zona de Decantação	14
3.4.3. Formação e Acumulação de Escuma	16
3.5. Problemática na Formação de Escuma em Reatores UASB	19
3.5.1. Formação da Escuma	19
3.5.2. Inconvenientes da Formação da Escuma.....	23
3.5.3. Controle da Formação da Escuma.....	25
3.6. Adaptações no Reator UASB	26

3.6.1.	Adaptações no Projeto do Separador.....	27
3.6.2.	Reator Híbrido	28
3.6.3.	Outras Alterações	29
3.6.4.	Remoção do Separador Trifásico.....	29
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1.	Unidades em Escala Piloto Utilizadas	32
4.2.	Partida do Reator UASB	36
4.3.	Definição das Fases Experimentais	37
4.4.	Parâmetros de Monitoramento	39
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1.	Manto de Lodo.....	42
5.2.	Escuma.....	53
5.3.	Coleta Automática do Esgoto Bruto	53
5.4.	Avaliação do pH, Alcalinidade, Ácidos Voláteis e DQO	57
5.5.	Intervenientes à Operação do Reator Piloto	64
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

1. INTRODUÇÃO

A carência em infraestrutura sanitária no Brasil é uma realidade realmente preocupante. O diagnóstico do SNIS – Sistema Nacional de Informações de Saneamento, de 2010, aponta para um déficit de, aproximadamente, 53,8% na coleta e de 62,1% no tratamento dos esgotos gerados no Brasil, valores expressivos, que mostram a carência do país neste setor. Este mesmo documento mostra claramente que essa demanda de infraestrutura é maior nos estados mais pobres, especialmente no Norte e Nordeste, com índices de tratamento dos esgotos gerados de 22,4 e 32,0%, respectivamente.

A evidente falta de mão-de-obra especializada e recursos favorece a permanência desta situação nestes locais. Desta forma, é importante o investimento em pesquisas referentes a sistemas simplificados de tratamento de esgotos, que consigam suprir esta necessidade, reduzindo custos e dificuldades operacionais nas regiões mais necessitadas do país.

Na década de 70, foram concebidos os reatores de manta de lodo e fluxo ascendente, por Lettinga e colaboradores. Utilizados, inicialmente, para efluentes industriais, esses reatores foram testados posteriormente no tratamento de esgotos domésticos, com sucesso. Segundo Chernicharo (2007), os processos anaeróbios de tratamento de esgotos, notadamente os reatores de manta de lodo (UASB), amadureceram nas últimas décadas, passando a ocupar posição de destaque, não só em nível mundial, mas também em nosso país, em face às nossas favoráveis condições ambientais de temperatura.

Segundo Van Haandel & Lettinga (1994), os reatores UASB mostraram ser uma alternativa bastante competitiva aos processos tradicionais de tratamento, especialmente em países de clima quente. A utilização de reatores de manta de lodo para o tratamento de esgotos sanitários já é uma realidade no Brasil e em outros países tropicais, notadamente na Colômbia, Índia e, mais recentemente, em países do oriente médio e África (CHERNICHARO, 2007).

A dispensabilidade de fornecimento de ar para o sistema e os altos teores de sólidos encontrados no lodo formado reduzem significativamente os custos operacionais envolvidos no processo, já que boa parte destes é constituída pelo consumo de energia e gerenciamento do lodo, nos sistemas aeróbios. No entanto, muitos problemas

operacionais lhe são conferidos, como emissão de maus odores, formação de espuma na superfície, obstrução dos dispositivos de entrada e saída e corrosão. Os reatores UASB exigem operação cuidadosa, muitas vezes difícil de ser realizada, principalmente em municípios de pequeno porte.

Uma das dificuldades citadas é a formação de espuma concentrada no interior do separador trifásico. Dois locais são propícios para a formação de espuma, em um UASB: no interior do separador trifásico, na interface de liberação dos gases formados durante a digestão anaeróbia; e na superfície da zona de decantação. Segundo Chernicharo (2007), em determinados reatores, especialmente com remoção pouco frequente desse material, pode ocorrer a formação de espuma mais concentrada e de difícil remoção por mecanismo hidrostático. O separador trifásico implica em dificuldades na remoção da espuma formada no interior do reator, quando este é dotado de anteparos nos vertedores de coleta de efluente. Essa espuma pode concentrar-se de tal modo que, em alguns casos, o separador trifásico é danificado.

Desta forma, faz-se necessário simplificar a operação dos reatores. Consultando a literatura especializada, foram observados diversos trabalhos propondo modificações na concepção de reatores UASB (vide Item 3.6), até mesmo na estrutura do separador trifásico, mas nenhum deles relativos à eliminação dessas estruturas, proposta no presente estudo.

Os reatores anaeróbios do tipo UASB têm sido utilizados em larga escala para o tratamento de esgoto sanitário em diversas regiões do Brasil. No Estado de São Paulo, os primeiros reatores UASB foram construídos com as zonas de decantação abertas, esperando-se que os gases formados na digestão anaeróbia pudessem ser coletados em sua quase totalidade nos separadores trifásicos. Tendo-se observado o escape de gases pela zona de decantação, com contribuição significativa para a emissão de maus odores e ocorrência de problemas de corrosão, esta região passou a ser também fechada. Diante disso, indaga-se a respeito dos possíveis efeitos sobre o processo de tratamento da não utilização dos separadores trifásicos, considerando a cobertura integral de toda a área superficial dos reatores. É possível que ocorra perda excessiva de sólidos, com decisiva influência sobre a remoção de matéria orgânica. Porém, é possível também que tais prejuízos ocorram com baixa magnitude, justificando as medidas propostas em função dos benefícios que podem ser auferidos.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar, experimentalmente, o comportamento de um reator anaeróbio do tipo UASB operando no tratamento de esgoto sanitário sem o separador trifásico e os dispositivos de retenção de espuma.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar os efeitos das modificações aplicadas no projeto do reator sobre a dinâmica do manto de lodo, isto é, sobre a conformação do perfil de sólidos ao longo da profundidade, relacionada com as velocidades ascensionais impostas.
- Acompanhar a intensidade de ocorrência do fenômeno do arraste de sólidos com o efluente do reator, sempre associando às velocidades ascensionais aplicadas, e identificar se é possível a manutenção de um manto de lodo estável e capaz de tratar eficientemente o esgoto.
- Avaliar as eficiências na remoção de DQO, analisando-se amostras integrais e filtradas do efluente do reator, de forma a permitir a conclusão sobre as variações provocadas pelas modificações propostas sobre a qualidade do esgoto tratado e a análise da viabilidade da adoção destas medidas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. REATORES ANAERÓBIOS NO TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS

Segundo o IBGE (2010), 66,3% do esgoto sanitário produzido no Brasil são coletados em rede pública, sendo que, destes, apenas 57,1% são tratados. Diante destes números, aliado ao quadro epidemiológico e ao perfil socioeconômico das comunidades brasileiras, constata-se a grande necessidade por sistemas simplificados de tratamento dos esgotos.

Estes sistemas devem conjugar os seguintes requisitos principais, dentre outros:

- Elevada sustentabilidade do sistema, relacionada à pouca dependência de fornecimento de energia, de peças e equipamentos de reposição, etc;
- Simplicidade operacional, de manutenção e de controle (pouca dependência de operadores e engenheiros altamente especializados);
- Baixos custos operacionais;
- Pouco ou nenhum problema com a disposição do lodo gerado na estação;
- Baixos requisitos de área;
- Fluxograma simplificado de tratamento (poucas unidades integrando a estação);
- Existência de experiência prática.

Nesses quesitos, o UASB apresenta-se como uma alternativa interessante, dada sua não necessidade de oxigênio para as reações bioquímicas que ocorrem em seu interior e, consequentemente, aos baixos requisitos de energia.

Atribui-se a Lettinga e colaboradores a motivação da aplicação de esgoto doméstico em reatores de manta de lodo e fluxo ascendente. No entanto, para esse tipo de efluente, os reatores UASB depararam-se com algumas limitações, tais como: formação de biomassa de baixa sedimentabilidade, acúmulo de sólidos suspensos do afluente no lodo, hidrólise como etapa limitante do processo, redução da atividade metanogênica específica e baixa produção de biogás (KALOGO & VERSTRAETE, 1999).

Entre os fatores que governam o desempenho dos reatores UASB tratando esgotos domésticos, reportados na literatura, estão: as características dos esgotos sanitários, a forma do reator, as condições operacionais e a produção de biogás (PEREIRA, 2007).

Na Tabela 1, são ilustradas as principais vantagens e desvantagens dos sistemas anaeróbios:

Tabela 1. Vantagens e Desvantagens dos Sistemas Anaeróbios. Fonte: Adaptada de Chernicharo (2007).

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ● Baixa produção de sólidos; ● Baixo consumo de energia, usualmente associado a uma elevatória de chegada. Isso faz com que os sistemas tenham custos operacionais muito baixos; ● Baixa demanda de área; ● Produção de metano, um gás combustível de elevado teor calorífico; ● Possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses; ● Tolerância a elevadas cargas orgânicas; ● Aplicabilidade em pequena e grande escala; 	<ul style="list-style-type: none"> ● As bactérias anaeróbias são susceptíveis à inibição por um grande número de compostos; ● A partida do processo pode ser lenta, na ausência de lodo de semeadura adaptado; ● Alguma forma de pós-tratamento é usualmente necessária; ● A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e ainda precisam ser mais estudadas; ● Possibilidade de geração de maus odores; ● Possibilidade de geração de efluente com aspecto desagradável; ● Remoção de nitrogênio, fósforo e patógenos insatisfatória. ● Baixo consumo de nutrientes ● Ambiente corrosivo

Os tópicos subsequentes apresentam detalhes sobre o tratamento de esgoto em reatores UASB, suas dificuldades operacionais e algumas propostas de adaptação do reator com vistas a melhorar seu desempenho e reduzir suas dificuldades práticas na operação.

3.2. PRINCÍPIOS DO FUNCIONAMENTO DOS REATORES UASB

Nos reatores UASB, o esgoto afluyente é introduzido na zona inferior do reator e é coletado na zona superior. Com um fluxo ascendente, o esgoto atravessa uma manta de lodo composta por grânulos e partículas biológicas, responsáveis pela remoção da matéria orgânica (DQO ou DBO, traduzidos por carboidratos, proteínas, lipídeos ou

seus metabólitos). O tratamento ocorre quando o esgoto entra em contato com esses grânulos, mediante processos físicos e bioquímicos (METCALF & EDDY, 2016). Em linhas gerais, a degradação da matéria orgânica está diretamente relacionada à formação de sólidos orgânicos complexos (lodo) e à produção de gases misturados (biogás).

Esses sólidos produzidos formam então um perfil de sólidos no reator, em função da sua massa específica e do seu tamanho. A região de lodo concentrado, ao fundo, denomina-se leito de lodo e a região de lodo disperso, mais superior, denomina-se manta de lodo (CHERNICHARO, 2007). Segundo Chernicharo (2007), um dos princípios fundamentais do processo é a sua habilidade em desenvolver uma biomassa de elevada atividade. Essa biomassa pode se apresentar na forma de flocos ou grânulos (1 a 5 mm de tamanho). Os gases produzidos em condições anaeróbias (principalmente metano e dióxido de carbono), por sua vez, tendem a subir até a superfície do reator.

O reator UASB caracteriza-se ainda pela presença de uma estrutura única, o separador de fases, que lhe subdivide em 3 zonas (METCALF & EDDY, 2016): zona de digestão, zona de sedimentação e zona de liberação do biogás. A primeira corresponde à zona descrita no parágrafo anterior.

O separador de fases (ou separador trifásico) é responsável pela separação dos gases contidos na mistura líquida. Segundo Chernicharo (2007), o principal objetivo deste separador é a manutenção do lodo anaeróbio dentro do reator, possibilitando que o sistema seja operado com elevados tempos de retenção de sólidos (idade do lodo elevada).

Próximo à estrutura de saída do efluente, sem a presença dos gases, forma-se uma zona propícia à sedimentação dos sólidos que foram carregados para a superfície do reator. Este local é chamado de zona de sedimentação. O fluxo líquido penetra no decantador (zona de sedimentação) por aberturas devidamente protegidas, com elementos defletores dos gases. Nessa zona, uma condição de baixa turbulência deve governar o regime hidráulico para permitir que parte dos sólidos particulados que a atingiram possam sedimentar, se depositar na face externa da parede inclinada do separador e posteriormente retornar à zona de digestão. Como consequência de um bom desempenho da sedimentação, o líquido tratado alcança a parte mais superior do reator por onde irá sair clarificado, isto é, com poucas partículas suspensas (LEITE, 2006).

Por fim, a região onde há a coleta e um acúmulo dos gases gerados na digestão é chamada de zona de liberação do biogás. O biogás formado a partir da digestão da matéria orgânica sobe à superfície do reator, é separado na altura do início do separador trifásico, atingindo a interface líquido/gás, de onde se desprenderá para a fase gasosa. Em seguida, é coletado no separador e deve sofrer algum tipo de tratamento ou aproveitamento energético. Segundo Van Haandel e Lettinga (1994), flocos de lodo, eventualmente aderidos às bolhas, tendem a sedimentar novamente para a zona de digestão, após o desprendimento do biogás na interface líquido/gás.

Jordão e Pêsoa (2011) descrevem esses compartimentos (agregando alguns outros) da seguinte maneira:

- Câmara de digestão: inferior, onde se localiza o leito de lodo (manta de lodo), e onde se processa a digestão anaeróbia. O esgoto, ao penetrar no interior do UASB, entra por esta zona de lodo, atravessando-a no sentido ascendente. Neste trajeto, parte da matéria orgânica permanece na zona de lodo, iniciando o processo de digestão anaeróbia;
- Separador de fases: dispositivo que fisicamente caracteriza a zona de sedimentação, e uma câmara de coleta de gases, separando a fase sólida (da câmara de digestão), da líquida e da gasosa; é na verdade um defletor de gases;
- Zona de transição: entre a câmara de digestão e a zona de sedimentação superior;
- Zona de sedimentação: o esgoto, penetrando pela abertura da parte inferior, alcança os vertedores de superfície, com uma velocidade ascensional adequada para a sedimentação dos sólidos e flocos, os quais retornam pela abertura das paredes para a zona de transição e de digestão. A parte líquida é recolhida com características de efluente clarificado;
- Zona de acumulação de gás: o gás produzido na fase de digestão é retido em uma zona superior de acumulação, onde é coletado e eventualmente aproveitado.

O reator UASB permite a obtenção de altas eficiências na degradação da matéria orgânica, sem, no entanto, exigir consumo elevado de energia. Dado o tratamento ser por via anaeróbia, o sistema consegue operar na ausência de oxigênio (não demandando fornecimento de ar), com baixo crescimento celular e com elevados tempos de retenção de sólidos. Segundo von Sperling (2001), a eficiência média obtida na remoção de DBO, em um reator UASB, situa-se, normalmente, na faixa de 55 a 75%, resultando em um efluente com concentração entre 60 e 120 mgDBO/L. No entanto, as eficiências

relativas à remoção de nutrientes (nitrogênio total e fósforo total) são baixas em reatores anaeróbios.

O lodo biológico produzido em excesso deve ser removido periodicamente do sistema, devendo ser desidratado (mecanicamente ou em leitos de secagem, por exemplo) e ser disposto ou aproveitado em local adequado. Outros subprodutos são o biogás que, como já citado, deve ser também tratado (normalmente é queimado em queimador elevado) ou aproveitado, e a espuma, a qual será discutida com maiores detalhes em tópicos posteriores.

Segue abaixo uma figura esquemática, retirada de Jordão & Pessoa (2011), do reator UASB:

Figura 1. Configuração do Reator UASB (Jordão & Pessoa, 2011)

3.3. CONDIÇÕES OPERACIONAIS

A eficiência de um reator UASB, na degradação da matéria orgânica, é função não apenas do seu projeto, mas das condições operacionais do sistema. Um exemplo claro disso é a DQO do afluente, a qual influencia significativamente a DQO do efluente. Na

prática, quanto maior a DQO do afluente, maior é a DQO do efluente. Neste estudo, em específico, foram abordadas com mais detalhes 2 condições de extrema relevância para o adequado funcionamento do processo: Tempo de Detenção Hidráulico (TDH) e Velocidade Ascensional; e Tratamento Preliminar. Destas, a primeira é de importância fundamental no presente estudo, dado o fato de ter sido a condição modificada em cada etapa da operação do reator UASB, e, por isso, foi descrita com mais detalhes que a segunda.

3.3.1. TDH e Velocidade Ascensional

O Tempo de Detenção Hidráulica, ou TDH, é um parâmetro fundamental para a operação dos reatores UASB. Como definição, o TDH é o tempo em que um volume infinitesimal de líquido permanece no reator (LEITE, 2006). TDH mais longos favorecem o processo de digestão anaeróbia em reatores UASB, na medida em que as reações bioquímicas envolvidas no processo são relativamente lentas. A norma ABNT NBR 12.209/2011 estabelece critérios de TDH para o dimensionamento de reatores de manta de lodo e fluxo ascensional. O TDH, para a vazão média, considerando a temperatura média do esgoto no mês mais frio do ano e o volume total do UASB, deve ser igual ou superior a:

- a) 6 h para temperatura do esgoto superior a 25 °C
- b) 7 h para temperatura do esgoto de 22 °C a 25 °C
- c) 8 h para temperatura do esgoto de 18 °C a 21 °C
- d) 10 h para temperatura do esgoto de 15 °C a 17 °C

Eventualmente, segundo a mesma norma, podem-se admitir tempos de detenção hidráulica inferiores aos mencionados acima, desde que justificados.

A norma ABNT NBR 12.209/2011 ainda estabelece critérios para a velocidade ascensional:

- A velocidade ascensional no compartimento de digestão do reator deve ser igual ou inferior a 0,7 m/h para a vazão média e inferior a 1,2 m/h para a vazão máxima.
- A velocidade de passagem do compartimento de digestão para o de decantação deve ser igual ou inferior a 2,5 m/h para a vazão média e a 4 m/h para a vazão máxima.

O TDH influi diretamente em outras condições operacionais, em especial na velocidade ascensional do fluxo. Basicamente, diminuições no valor de TDH são acompanhadas de elevações na velocidade ascensional, o que provoca arraste dos sólidos afluentes e da biomassa ativa (MAHMOUD *et al.*, 2003). Espera-se, portanto que, com TDH mais longos, menos espuma se forme, pois os sólidos serão removidos de maneira mais eficaz, tendo menor probabilidade de atingir a superfície.

Segundo Seghezze *et al.* (1998) e Kato *et al.* (1999), o comportamento do leito de lodo tende a ser mais ou menos estático, quando reatores operam com baixa velocidade ascensional, da ordem de 0,5 a 0,7 m/h. Nesta velocidade, os reatores UASB conseguem manter uma elevada biomassa ativa no reator, mantendo uma eficiência de remoção de sólidos e matéria orgânica razoável (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

Segundo Kato *et al.* (1999), o reator com leito de lodo estático tende a formar zonas mortas e curtos-circuitos hidráulicos no interior do reator, prejudicando o desempenho do sistema na remoção de matéria orgânica, caso a alimentação do reator não seja realizada adequadamente.

Chernicharo *et al.* (1999) destacam que boas condições de mistura podem ser conseguidas com o aumento da vazão afluente ao reator e, conseqüentemente, da velocidade ascensional. Como o controle da velocidade ascensional em reatores UASB tratando esgotos domésticos é ponto chave da retenção de sólidos, os reatores têm que operar com baixas velocidades ascensionais, a favor da retenção de sólidos, perdendo em mistura e transferência de massa (MAHMOUD *et al.*, 2004; PEREIRA, 2007).

Em um estudo com um reator UASB em escala plena, na Colômbia, tratando esgotos domésticos, Peña *et al.* (2006) avaliaram o desempenho do reator para diferentes condições operacionais de TDH (10, 8, 6 e 5 h). Os autores concluíram que as melhores eficiências na remoção de DQO e SST ocorreram na condição de TDH de 6 e 8 h, enquanto, nas condições de sobrecarga (5 h) e subcarga (10 h) hidráulica, foram constatadas formação de zonas estagnadas e caminhos preferenciais do lodo, paralelamente com a perda de eficiência e perda de sólidos com o efluente.

Cavalcante (2003) relata que a perda de sólidos será inevitável com a redução do TDH se o projeto do separador não for adequado a tais condições. No entanto, Gnanadipathy & Polprasert (1993) conduziram experimentos com reatores UASB em escala piloto operando a uma temperatura de 30°C, tratando esgotos domésticos, com TDH variando

de 24 a 3 h. Em TDH de 3 h, a eficiência do reator foi de 90% na remoção da DQO. Ressalta-se, no entanto, que, mesmo com um TDH baixo, a velocidade ascensional utilizada foi de apenas de 0,57 m/h, abaixo do valor médio de projeto, de 0,7 m/h (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994), indicando que talvez a velocidade ascensional seja um parâmetro mais relevante que o TDH para a eficiência do processo.

Segundo Mahmoud *et al.* (2003), a velocidade ascensional provoca dois efeitos opostos. Por um lado, aumentando a velocidade ascensional aumenta-se a taxa de colisões entre partículas suspensas e o lodo, isto é, melhora a mistura do conteúdo, o que pode elevar a eficiência de remoção de sólidos. Por outro lado, aumentando a velocidade ascensional pode-se aumentar a força hidráulica cisalhante, carregando consigo os sólidos da manta de lodo e auxiliando na perda de sólidos do sistema.

Versiani (2005) avaliou o desempenho de reatores UASB, tratando esgotos sanitários, operando em condições de velocidade ascensional consecutivamente superior (0,6, 0,8, 1,0 e 1,6 m/h) e, conseqüentemente, com TDHs menores (9, 7, 5 e 3 h). O autor relata que houve uma melhora na remoção de sólidos suspensos totais até a fase operacional de 5 h de TDH e velocidade ascensional de 1,0 m/h. Além disso, notou que houve uma redução significativa na taxa de acumulação de espuma na superfície da zona de decantação nesta condição. Na condição de TDH de 3 h, houve queda na remoção de DQO e DBO totais, embora a eficiência na remoção de sólidos tenha sido bastante elevada, de 90%.

Mahmound *et al.* (2004) e Leitão (2004) destacam a existência de controvérsias nos resultados de remoção de DQO e sólidos particulados, obtidos em reatores UASB operados com baixos valores de TDH, talvez devido aos processos operacionais empregados na variação do TDH e, conseqüentemente, da velocidade ascensional.

Ressalta-se, portanto que ainda são necessários mais estudos para elucidar melhor o efeito da redução do TDH, devendo estes ser conjugados ao aumento da velocidade ascensional, principalmente em reatores operando em escala real (LEITE, 2006).

3.3.2. Tratamento Preliminar

Segundo Chernicharo (2007), a acumulação de sólidos não biodegradáveis no sistema é altamente detrimental ao processo de tratamento, levando à formação de zonas mortas e caminhos preferenciais no reator, diminuindo o volume de biomassa no sistema e a eficiência do processo de tratamento.

Desta maneira, é imprescindível que a estação que contenha reatores anaeróbios em sua composição contenha unidades de tratamento preliminar do esgoto, tais como grades e caixas de areia.

Pressinotti (2014) destaca as consequências de um tratamento preliminar deficiente sobre os reatores anaeróbios, listando-as conforme os itens seguintes:

- Acúmulo de detritos nos reatores anaeróbios;
- Adensamento do lodo;
- Entupimento dos distribuidores;
- Contaminação da espuma;
- Contaminação do lodo;
- Diminuição do volume útil dos reatores anaeróbios;
- E diminuição da produção de biogás.

De fato, Chernicharo (2007) faz as seguintes recomendações ao projeto de estações com reatores UASB:

- Para estações de pequeno porte: utilização de grade média (espaçamento entre 20 e 40 mm), seguida de grades finas (aberturas entre 10 e 15 mm) ou ultrafinas (aberturas entre 6 e 10 mm);
- Para estações de médio e grande porte: utilização de grade grosseira (espaçamento entre 40 e 100 mm), seguida de grades finas (aberturas entre 10 e 20 mm) e de peneiras (aberturas entre 0,5 e 6 mm);

A Norma ABNT NBR 12.209/2011, por sua vez, recomenda que o tratamento anaeróbio seja precedido de remoção de sólidos grosseiros e areia, mediante utilização de dispositivo de remoção de sólidos com aberturas iguais ou inferiores a 12 mm para vazão máxima até 100 L/s, e a 6 mm para vazão máxima acima de 100 L/s.

De fato, a SANEPAR, em seus projetos de reatores UASB mais recentes, tem exigido a implantação de peneiras no tratamento preliminar com espaçamento mínimo de 6 mm, tendo em vista as grandes dificuldades apontadas pelos operadores na remoção da espuma formada nos reatores anaeróbios. De forma semelhante, a SANASA tem adotado como estratégia para os seus projetos uma remoção mais criteriosa dos sólidos gradeados no tratamento preliminar. Para tal, tem sido prevista uma sequência de grades sucessivas, com a menor delas com espaçamento igual a 3 mm (GRANDIN, 2005).

Pagliuso *et al.* (2002) reforçam a ideia de que a espuma encontrada nos reatores UASB da ETE Piracicaba aparentam serem formadas por materiais trazidos no afluente, que deveriam ter sido retidos no tratamento preliminar.

Vale ressaltar, no entanto, a conclusão de Ross (2015), sobre a substituição da grade de 15 mm por uma grade de 3 mm na ETE Padilha Sul/PR, a qual não contribuiu para a redução da taxa de formação de espuma, apesar da significativa melhora na aparência do material devido à ausência de sólidos grosseiros.

Por fim, o desenvolvimento de novos tipos de gradeamento e peneiramento têm sido fundamental. O surgimento de novas grades mais eficientes e a redução do custo desses equipamentos têm contribuído para a melhoria no desempenho dos reatores anaeróbios.

3.4. DIFICULDADES PRÁTICAS NA OPERAÇÃO DE REATORES UASB

Muitas são as dificuldades práticas encontradas durante a operação de reatores UASB. Relativas ao separador trifásico, três delas merecem destaque: a construção da estrutura do separador, a perda de biogás por diluição no efluente e liberação na zona de decantação (mesmo com a implantação do separador trifásico) e a formação e acumulação da espuma, problema que receberá abordagem especial.

3.4.1. Construção da Estrutura do Separador Trifásico

Segundo Chernicharo (2007), o separador de gases, sólidos e líquidos (separador trifásico) é um dispositivo essencial que necessita ser instalado na parte superior do reator, cujo principal objetivo é a manutenção do lodo anaeróbio dentro do reator, possibilitando que o sistema seja operado com elevados tempos de retenção de sólidos (idade do lodo elevada).

Seu projeto exige uma série de recomendações, como limites para as dimensões do próprio separador e nas aberturas para a zona de decantação, inclinações das paredes, instalação de defletores e utilização de materiais impermeáveis ao gás e resistentes à corrosão, entre outros, o que implica em dificuldades na sua construção.

Quando projetado em concreto armado, é uma estrutura complexa e difícil de ser realizada e que exige um grau de cuidado um pouco mais elevado. Quando em concreto ou aço, exige a utilização de revestimentos que protejam a estrutura contra a corrosão (CHERNICHARO, 2007), o que encarece a obra. É comum, neste caso, a ocorrência de problemas de vazamentos de gases e corrosão. Atualmente, outros materiais têm sido

empregados nesta estrutura, como PVC, lonas de polipropileno ou de materiais similares, e fibra de vidro, os quais reduzem consideravelmente as dificuldades construtivas, por serem materiais não corrosivos, menos volumosos e mais leves.

No entanto, mesmo esses materiais apresentam desvantagens. Além de serem mais frágeis que o concreto e o aço, e, portanto, mais passíveis de flexão ou rompimento, pesquisas parecem indicar que elas propiciam maior formação de espuma no interior do separador trifásico. Pagliuso et. al (2002) levantam a possibilidade de a superfície áspera da fibra de vidro contribuir para a formação de uma camada tampão no interior do separador trifásico, impedindo o desprendimento dos gases que ali haveriam de ser coletados. Já a utilização de aço inoxidável (apesar da disparidade no custo) parece ajudar a prevenir a constituição de camadas espessas dentro da estrutura.

De maneira geral, no entanto, fica evidente que, independente do material utilizado, o separador trifásico, embora seja talvez de importância fundamental para o adequado funcionamento do processo anaeróbico no reator UASB, é uma estrutura que pode implicar em dificuldades na construção e operação do reator. A possibilidade de sua remoção, sem prejuízos significativos para o processo, seria uma melhoria considerável para os reatores UASB existentes, que têm apresentado problemas operacionais significativos com o seu rompimento e com a formação excessiva de espuma nesta zona.

3.4.2. Perdas de Biogás por Diluição no Efluente e Liberação na Zona de Decantação

Um segundo problema relacionado ao separador trifásico é que, embora esta estrutura seja responsável pela separação da fase gasosa do sistema e pela coleta do biogás, ainda assim há uma grande perda de biogás por diluição com o efluente, devido à solubilidade daquele no líquido, bem como por liberação na zona de decantação.

Chernicharo (2007) cita que os separadores trifásicos possibilitam a coleta dos gases produzidos no processo de tratamento, mas apenas os que apresentam menor solubilidade em água e que se liberam da fase líquida. Esses gases constituem o biogás propriamente dito, pois são ricos em metano (usualmente entre 70% e 80%). Já os gases que apresentam maior solubilidade em água, como é o caso do sulfeto de hidrogênio (H_2S), permanecem na fase líquida, podendo ser causadores de problemas, como corrosão e emissão de maus odores.

A Figura 2 apresenta uma ilustração das rotas de conversão de DQO e fluxo de metano em reatores UASB:

Figura 2. Rotas de Conversão de DQO e Fluxos de Metano em Reatores UASB.
Fonte: Lobato (2014).

Percebe-se que, da DQO convertida em metano, uma parcela incorpora o biogás captado e tratado (normalmente com flares); outra é captada, mas escapa com o gás residual; e ainda outra, fica dissolvida no efluente, com concentração dependente principalmente da concentração de DQO no afluyente e da temperatura (PROBIOGÁS, 2015). A parcela que sai dissolvida no efluente é bastante difícil de ser controlada, podendo apresentar valores significativos quando a concentração no afluyente é baixa.

Lobato (2014) cita diversos autores que apresentam valores percentuais de perdas de metano dissolvido no efluente em seus trabalhos em relação ao metano produzido, tais quais:

- Agrawal et al (1997) – 50%;
- Keller & Hartley (2003) – 15%;
- Seghezze (2004) – 18%;
- Souza & Chernicharo (2011) – 36 a 40%.

A mesma autora cita que há ainda uma perda de metano devido às emissões que ocorrem na superfície dos decantadores dos reatores UASB, estimada por Souza & Chernicharo (2011) em 4%.

A SANEPAR tem incorporado em seus projetos mais recentes o fechamento completo dos reatores UASB, de forma a minimizar a perda de biogás pela zona de decantação. Em especial, essas alterações devem ser inseridas nos projetos de reforma das ETE's São Jorge e CIC Xisto, no Paraná. Para facilitar a visualização do efluente pelas calhas de coleta, serão inseridas tampas de inspeção de PRFV, hermeticamente fechadas.

Semelhantemente, a SANASA incorporou já em seus projetos o fechamento completo dos reatores UASB, visando reduzir o mau cheiro provocado pela emissão do H_2S pela zona de decantação. Em especial, sobre este problema, outras medidas foram tomadas nas ETE's de Campinas/SP.

3.4.3. Formação e Acumulação de Escuma

Uma terceira dificuldade prática encontrada é a formação e acumulação de escuma na superfície do reator. Essa escuma se desenvolve em duas regiões do reator: na superfície líquida da zona de decantação e na superfície líquida no interior do separador trifásico. De maneira geral, a escuma pode ser entendida como uma camada de materiais em condição flutuante, embora a definição vá ser ampliada em tópico posterior (Item 3.5.1).

O separador trifásico implica em dificuldades na remoção da escuma formada no interior do reator, quando este é dotado de anteparos nos vertedores de coleta de efluente. Essa escuma pode concentrar-se de tal modo que, em alguns casos, o separador trifásico é danificado.

Esse problema tem sido observado em algumas ETEs da SANEPAR, no Paraná. As Figuras 3 e 4 apresentam fotos com acumulação de escuma na zona de decantação dos reatores UASB da ETE São Jorge:

Figura 3. Escuma nas Zonas de Decantação da ETE São Jorge – Paraná (Fonte: ENCIBRA S/A).

Figura 4. Acúmulo de Escuma Próximo ao Anteparo – ETE São Jorge, Paraná (Fonte: ENCIBRA S/A).

O problema é ainda mais grave na ETE CIC Xisto (Figuras 5 a 8). Nesta, observa-se que a espuma encontra-se muito concentrada, inclusive com crescimento de plantas na superfície. O anteparo da espuma, em alguns locais, encontra-se já deformado. A remoção manual desta concentrada camada exige grande mão de obra e cuidado considerável.

Figura 5. Escuma nas Zonas de Decantação da ETE CIC Xisto, Paraná (Fonte: ENCIBRA S/A).

Figura 6. Acúmulo de Escuma Espessa em Zona de Decantação e Crescimento de Plantas – ETE CIC Xisto, Paraná (Fonte: ENCIBRA S/A).

Figura 7. Escuma Espessa em UASB da ETE CIC Xisto – Paraná (Fonte: ENCIBRA S/A).

Figura 8. Escuma Espessa em UASB e Anteparo com Deflexão – ETE CIC Xisto, Paraná (Fonte: ENCIBRA S/A).

Por fim, o mesmo problema é observado em outras ETES, como a ETE Oeste, em Cascavel, a ETE Santa Quitéria, em Curitiba (Figuras 9 e 10), e a ETE Lageado, em Botucatu – SP, onde a formação de uma espessa camada de espuma resultou no rompimento do separador trifásico de um dos reatores.

Figura 9. Escuma Acumulada em UASB Circular (RALF) da ETE Oeste, em Cascavel – PR (Fonte: ENCIBRA S/A).

Figura 10. Escuma Acumulada em Zona de Decantação da ETE Santa Quitéria – Paraná (Fonte: ENCIBRA S/A).

O tópico seguinte fará uma abordagem mais completa deste último problema destacado: a formação e acumulação de escuma.

3.5. PROBLEMÁTICA NA FORMAÇÃO DE ESCUMA EM REATORES UASB

3.5.1. Formação da Escuma

Muitos autores têm relatado o problema da formação de escuma, seja no tratamento de efluentes industriais, seja no tratamento de esgotos domésticos (LAUBSCHER *et al.*, 2001; VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994; VERSIANI, 2005).

A escuma pode ser definida basicamente como uma camada de materiais flutuantes, que forma-se na superfície de reatores anaeróbios. Van Haandel e Lettinga (1994) relacionaram a escuma acumulada nos reatores UASB, tratando esgotos domésticos, com a questão do lodo flotante ou flutuante. Por sua vez, Laubscher *et al.* (2001), em seu estudo com reatores UASB tratando efluentes da destilação de cereais, caracterizaram a camada de escuma formada como uma camada gelatinosa espessa, extremamente pegajosa e oleosa, coberta com uma fina crosta, contendo ainda pedaços de partículas grosseiras, lodo granular morto e outras partículas mais finas. Pagliuso *et al.* (2002), por sua vez, relata que a escuma é aparentemente constituída de cabelo, graxa e outros materiais ainda grosseiros. Santos *et al.* (2003) definem a camada de escuma como resultante de parte dos sólidos contidos no afluente, compostos por óleos, graxas e outros materiais, que em mistura com gases, emergem à superfície. Segundo

Chernicharo (2007), a espuma pode conter gordura, óleos, ceras, sabões, restos de alimentos, cascas de frutas e vegetais, cabelo, papel e algodão, pontas de cigarros, materiais plásticos e materiais similares. Em todas essas definições, pode-se considerar como característica comum o fato de a espuma ser composta por materiais com baixa densidade, que flutuam à superfície em vista de o fluxo ser ascendente e de o biogás produzido emergir à superfície.

Pode-se compreender essa formação como um resultado da presença de materiais de massa específica inferior a da água, tais como óleos, graxas, gorduras, materiais vegetais, cabelos, etc, que, já apresentando uma tendência a flutuar e sendo de biodegradação mais lenta, podem se desvencilhar da camada de lodo na zona de digestão e subir em direção à superfície, influenciadas pelo fluxo da fase líquida (velocidade ascensional) e pelas correntes dos gases gerados no tratamento.

Muitos fatores podem influenciar a formação de espuma em reatores UASB tratando esgotos domésticos, dentre os quais estão: a presença de materiais flutuantes, a idade do lodo, a presença de lipídeos (óleos, gorduras e graxas), as variações de temperatura, a flotação do lodo e a mistura insuficiente (PEREIRA, 2007; PAGILLA *et al.*, 1997, YODA & NISHIMURA, 1997, HALALSHEH *et al.*, 2005, SOUZA, 2006).

Líquidos com concentrações elevadas de óleos e graxas, gorduras e materiais particulados têm maior potencial de formação de espuma em reatores de tratamento. Também os reatores que apresentam em seu interior elevada produção ou introdução de gases e intensos fluxos hidráulicos ascendentes predispõem-se à ocorrência de camada de espuma. Esses seriam alguns elementos integrantes do fenômeno de produção ou formação de espuma (LEITE, 2006).

O efeito da idade do lodo e da temperatura na formação de espuma foi avaliado por Halalsheh *et al.* (2005). Os resultados de seus experimentos demonstraram que a produção de espuma aumenta tanto com a redução da idade do lodo quanto com a redução da temperatura. A temperatura mais elevada favorece a biodegradação dos lipídeos, reduzindo a formação de espuma. O aumento da idade do lodo parece provocar efeito semelhante, aumentando a biodegradação dos compostos formadores da espuma.

Souza (2006) avaliou ainda o efeito das condições operacionais de TDH, velocidade ascensional e presença do tratamento preliminar na formação da espuma. Foram operados dois reatores idênticos, com TDH de 9, 7 e 5 h, um dos quais com um

peneiramento forçado, com o intuito de reduzir o tamanho médio das partículas presentes no afluente. O autor observou um aumento significativo na formação de espuma para o TDH de 5 h, em ambos os reatores, da ordem de 32 e 8,7 vezes ao TDH de 7 h, respectivamente. A espuma formada, neste caso, continha grande presença de lodo. A pesquisa demonstrou o impacto significativo da redução do TDH na formação de espuma na superfície.

Outro fator que influencia fortemente na formação de espuma é a flotação do lodo, que, segundo Miron *et al.* (2000), é altamente dependente da concentração de lipídeos no afluente e das condições operacionais do reator. Souza (2006) reforça esse pensamento ao citar que, com velocidades mais altas, o arraste de sólidos com o fluxo líquido passa a ser o mecanismo responsável pela formação de espuma no reator.

Dois locais são propícios para a formação de espuma, em um UASB: no interior do separador trifásico, na interface de liberação dos gases formados durante a digestão anaeróbia; e na superfície do decantador. Independentemente do lugar aonde a espuma vier a se formar/acumular, a quantidade e as suas características vão depender, essencialmente, das características do esgoto afluente, em termos de presença de sólidos suspensos e de quantidade de óleos e graxas (CHERNICHARO, 2007).

A espuma formada nesses dois locais apresentam diferenças entre si sob o prisma quantitativo e qualitativo, na medida em que os dois ambientes citados são diferentes e se dispõem a funções distintas.

No caso da espuma formada no decantador de um reator UASB, esta só ocorrerá caso o reator esteja equipado com retentores de espuma ou caso a coleta do efluente final seja realizada por tubulação perfurada ou calha afogada (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994). Caso contrário, ao menos teoricamente, a espuma simplesmente verterá pela calha de coleta. Na prática, mesmo sem a presença de retentores de espuma, ainda assim há acúmulo de espuma na superfície.

Segundo Souza (2006), pode haver comprometimento da qualidade do efluente se houver o desprendimento de sólidos da espuma formada nos decantadores, efeito contrário ao desejado quando se colocam os retentores. Por outro lado, a espuma pode auxiliar no controle de odores gerados, devido à presença neste de microrganismos aeróbios responsáveis pela oxidação do sulfeto (SOUZA, 2006), efeito que parece não ocorrer tão frequentemente na prática, como pode-se observar nas ETes da SANEPAR,

no Paraná, onde, apesar da formação de uma espessa camada de espuma nos reatores UASB, há ainda a emissão de maus odores.

A formação de espuma no interior do separador trifásico já é mais problemática, devido ao fato de esta ser uma zona fechada e de difícil acesso. Por este motivo também, são poucos os relatos sobre a espuma formada nesta região. Segundo Lettinga & Hulshoff Pol (1991), a formação de espuma no interior do separador trifásico pode impedir a liberação do biogás fazendo com que o mesmo caminhe para zona de decantação levando consigo partículas de lodo e prejudicando a qualidade do efluente.

Dentre os relatos de acumulação de espuma nesta região, estão os de Sato et al. (2006), em reatores UASB na Índia; e Schellinkhout & Collazos (1992), com reatores piloto na Colômbia. Em ambos os casos observou-se um comprometimento do desempenho das estações, demandando soluções para a remoção da espuma. No primeiro caso, foi destacada a necessidade de treinamento e experiência dos operadores em avaliar o desempenho e definir os intervalos de descarte. No segundo, como se tratava de uma escala piloto, com maior facilidade de operação, foram realizadas adaptações, como injeção de gás sobre a camada de espuma para aumentar a mistura na região. Os autores destacam que a espuma pode ser degradada se houver boa mistura, e, caso contrário, deve haver dispositivos para sua retirada do interior do separador (PEREIRA, 2007).

Como consequência dessa acumulação de espuma no interior do separador trifásico, esta zona pode ficar estagnada, ficando a mistura desta região comprometida pela baixa produção de gases, facilitando a acumulação e a agregação da camada de espuma (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994). Desta maneira, a mistura nesta região pode ser um parâmetro de relevância no controle da formação de espuma no separador trifásico.

Segundo Rocha (2002) e Santos (2003), alguns reatores UASB são encontrados totalmente abertos no compartimento de gases ou com grande acessibilidade, possibilitando alguma investigação sobre a acumulação de espuma nessa região.

É importante frisar, no entanto, que entre as duas regiões com potencial de formação de espuma existem diferenças funcionais bastante importantes. Na zona de decantação, não se espera que haja grandes desprendimentos de gases; no interior do separador trifásico, em contrapartida, há um desprendimento considerável dos gases gerados na digestão anaeróbia. Outra diferença importante, está no fluxo da fase líquida. Neste caso, não há

dúvidas de que o fluxo é mais intenso na zona de decantação, dado o fato de ali estar localizada a canaleta de saída do efluente.

Sato et al. (2006) e Schellinkhout & Collazos (1992) reforçam, desta maneira, a necessidade de remoção periódica da espuma do reator. Segundo Chernicharo (2007), em determinados reatores, especialmente com remoção pouco frequente desse material, pode ocorrer a formação de espuma mais concentrada e de difícil remoção por mecanismo hidrostático. Dessa forma, é prudente que os reatores disponham de dispositivos que possibilitem tanto a remoção de espuma mais fluida quanto de espuma mais concentrada. Vários outros autores comentam da necessidade de remoção mais frequente da camada de espuma como uma prática a ser incorporada na operação e manutenção dos reatores UASB (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994; FLORENCIO *et al.*, 2000; LAUBSCHER *et al.*, 2001; SATO *et al.*, 2005).

3.5.2. Inconvenientes da Formação da Espuma

A espuma acumulada na superfície de reatores UASB pode provocar uma série de inconveniências ao correto funcionamento dos reatores, algumas das quais bastante problemáticas. Nas ETE's da SANASA, em Campinas, tem sido previstos dispositivos internos de remoção de espuma, dada a preocupação com as consequências da acumulação desta sobre o sistema (GRANDIN, 2005). De forma semelhante, a SANEPAR tem incorporado, aos seus projetos mais recentes com reatores UASB, dispositivos de remoção de espuma, preocupados com as dificuldades diárias dos seus operadores na remoção da mesma. Sato *et al.* (2005) reforçam essa necessidade em seus trabalhos, ao inserir, dentro de um prognóstico de melhorias do processo de seus reatores UASB, tratando esgotos na Índia, a operação periódica de remoção de espuma.

A espuma formada na zona de decantação de um reator UASB tende a ser carregada com o efluente, pela canaleta de coleta, caso nenhum dispositivo de retenção de espuma seja previsto. Segundo Van Haandel e Lettinga (1994), a função dos retentores de espuma é evitar que o material flutuante seja descarregado junto com o efluente. Esses mesmos autores relatam que, avaliando dois reatores UASB na Índia, um com retentor de espuma e o outro sem o dispositivo, a melhoria na qualidade do efluente no primeiro foi quase insignificante, concluindo, portanto, que não havia grande vantagem em se colocar o retentor. Isto indica que talvez se possa impedir a acumulação de espuma na zona de decantação mediante a supressão dos retentores, sem que haja grandes prejuízos

para a qualidade do efluente. De fato, os projetos de reforma das ETE's São Jorge e CIC Xisto, no Paraná, já incorporaram a remoção dos retentores de espuma dos UASBs.

Outro inconveniente da formação da camada de espuma na superfície é relatado por Van Haandel e Lettinga (1994). Segundo eles, a formação de uma camada de espuma espessa e dura pode dificultar o desprendimento do biogás produzido no processo. Segundo Chernicharo (1997), a taxa de liberação de biogás no interior do separador de fases deve ser elevada o suficiente para vencer uma possível camada de espuma.

Pagliuso *et al.* (2002) citam um caso extremo da problemática da formação de uma camada de espuma no interior do separador trifásico. Após dois anos de operação de um sistema em escala real no município de Piracicaba, formou-se um bloqueio total no separador trifásico, de forma a impedir a coleta do biogás nesta zona. O fato foi notado devido a um borbulhamento excessivo na superfície da zona de decantação dos reatores.

No outro extremo, encontra-se a problemática da taxa de liberação excessiva de gases. Segundo Van Haandel e Lettinga (1994) e Chernicharo (2007), o prejuízo provocado por esta situação seria relacionado ao entupimento na tubulação de saída dos gases, devido aos sólidos da camada de espuma, que atingissem os dispositivos de remoção de gás.

Por fim, outro inconveniente ocasionado pela formação de uma camada de espuma em reatores UASB refere-se à perda de volumes para os processos. Santos *et al.* (2003) relatou a perda de, aproximadamente, 3 cm por mês da altura útil do reator, devido à acumulação de espuma no interior do separador trifásico. Segundo o mesmo autor, esta ocorrência parece não estar relacionada apenas ao crescimento da camada de espuma acima da superfície, mas também ao crescimento da camada submersa. Em seus estudos, Rocha (2002) verificou que a espessura total da camada de espuma formada em seu reator UASB era de 63 cm, dos quais apenas 18 cm estavam emersos e os demais 45 cm estavam submersos, provocando perda significativa de volume útil na fase líquida.

ROSS (2015), em seu estudo, apresenta valores de produção de espuma que variam de 4,82 a 105,33 gST/kgDQOaplicada. Segundo ela, a amplitude destes resultados deve-se aos projetos do reator UASB, as eficiências de remoção de DQO, as localidades e as condições de operação serem diferenciadas. Mas observa-se que o limite superior obtido em sua pesquisa é bastante elevado.

3.5.3. Controle da Formação da Escuma

Basicamente, três formas de controle da formação de escuma são enfocadas nos trabalhos sobre o assunto: a promoção de mecanismos de agitação nas zonas de formação das camadas; a introdução de dispositivos de sucção da escuma; e o projeto adequado do separador trifásico. Não há dúvidas de que a inserção de mecanismos de controle da formação de escuma se traduz como uma vantagem operacional.

Moem (2003) enfatiza que o mecanismo fundamental do controle é a promoção de uma adequada mistura da camada de escuma, promovendo sua dispersão e impossibilitando a formação de camadas muito espessas e duras. Lettinga e Hulshoff Pol (1991) reforçam a necessidade de se preverem mecanismos de agitação na região de formação de escuma, como medida de controle.

Outra forma de controle é mediante um adequado projeto do separador trifásico, possibilitando que a escuma seja removida desta região. Segundo Chernicharo (2007), exceto para os casos de reatores UASB tratando esgotos muito concentrados, a liberação da escuma da zona de decantação, juntamente com o efluente do reator, não implica em qualquer deterioração significativa do efluente. Desta maneira, é possível pensar que o acréscimo da DQO, no efluente final, com a liberação da escuma do decantador, acrescida da escuma formada no separador, também não seja comprometedora (PEREIRA, 2007).

Chernicharo (2007) recomenda que o projeto do reator UASB preveja pontos de inspeção nos separadores trifásicos, perfeitamente herméticos. A escolha do material do separador trifásico parece poder interferir no efeito de acumulação da escuma no seu interior (LEITE, 2006). Pagliuso et. Al (2002) levantam a possibilidade de a superfície áspera da fibra de vidro contribuir para a formação de uma camada tampão no interior do separador trifásico. Já a utilização de aço inoxidável (apesar da disparidade no custo) parece ajudar a prevenir a constituição de camadas espessas dentro da estrutura.

Além disso, Chernicharo (2007) relata a necessidade de que o separador trifásico tenha dimensões suficientes para a formação de uma interface líquido/gás para permitir a liberação de gases sem grandes dificuldades.

Por fim, nenhum dos mecanismos de controle da formação de escuma citados acima descartam a necessidade de retirada periódica de escuma, por meio da inserção de dispositivos para esse fim. Dentre as possíveis opções, estão as calhas de coleta de

escuma no interior do separador trifásico (CHERNICHARO, 2007). No entanto, a remoção por meio de calhas de coleta, pode não ser tão simples, dependendo da consistência da espuma formada, além do que, a mesma pode ficar aderida às paredes internas do separador podendo a sua retirada não ser tão eficiente (PEREIRA, 2007).

As ETE's da SANASA, em Campinas-SP, por exemplo, já preveem dispositivos internos ao reator UASB, constituídos de calhas coletoras e tubulações para descarga de espuma em caixas externas (GRANDIN, 2005). Essa, portanto, é uma preocupação já incorporada atualmente na cultura das companhias de saneamento.

Pagliuso et al. (2002) enfatiza a necessidade de inserir no projeto portas de inspeção nos separadores trifásicos, uma vez que a facilidade de limpeza interna dessa região do reator e a prevenção de vazamentos dependem disso. Van Haandel e Lettinga (1994) reforçam essa ideia, ressaltando que, mesmo quando a taxa de formação de espuma não é alta, é importante que seja previsto um mecanismo que facilite a operação da remoção de espuma no separador trifásico.

Em seminário realizado pela SANEPAR, em 24 de março de 2014, foi relatado e enfatizado que um dos desafios atuais para os projetos dos reatores UASB é desenvolver soluções para se remover satisfatória e continuamente a espuma do compartimento de gás, bem como evitar o selamento, as grandes perdas de gás e pressão e evitar fontes de ignição na região. Para o compartimento de decantação, foi sugerida a remoção dos retentores de espuma, enviando a espuma para as etapas subsequentes da estação de tratamento (PRESSINOTTI, 2014).

3.6. ADAPTAÇÕES NO REATOR UASB

Várias concepções modificadas ou adaptadas, de reatores UASB, foram desenvolvidas para a aplicação com efluentes industriais (KASSAM et al, 2002). Para o tratamento de esgotos domésticos, no entanto, não há atualmente uma versão de reator UASB, ou de um reator anaeróbico de alta taxa, ou ainda, uma adaptação na forma dos reatores, que tenha agregado maiores vantagens em relação a um reator UASB convencional. As alternativas desenvolvidas, ainda que tenham apresentado vantagens, estão longe de substituí-los (PEREIRA, 2007).

Dentre as possibilidades de modificações e adaptações no reator UASB passíveis de realização, estão as adaptações no separador trifásico e o reator híbrido. Embora existam muitas outras modificações já divulgadas, estas serão as únicas enfocadas, dado o

objetivo do presente trabalho. Ao final, será também descrito um estudo de caso real, na ETE Lageado, em Botucatu, onde os separadores trifásicos foram removidos, estando a estação operando sem essas estruturas desde o início do ano de 2014.

3.6.1. Adaptações no Projeto do Separador

Lettinga & Hulshoff Pol (1991) relatam que as alterações no projeto do separador trifásico são um campo de muitas inovações tecnológicas. Destacam-se aqui três versões de reatores UASB modificados, duas delas desenvolvidas, respectivamente, pelas empresas Paques e Biothane e o reator com decantador de alta taxa (CAVANCANTI, 2003).

Segundo Lettinga & Hulshoff Pol (1991), a versão de reator UASB modificado, desenvolvido pela Paques, o BIOPAQ UASB®, melhora a separação da fase gasosa do sistema trifásico, ao incorporar maior número de coletores de gás, em diferentes níveis. Segundo a Veolia Water Systems (2014), o separador trifásico desse reator permite que ele realize a separação das fases mesmo em condições de alta turbulência. Basicamente, é uma solução bastante interessante para efluentes concentrados, em que a carga orgânica é o parâmetro de dimensionamento do reator e em que a produção de gases é mais importante que o fluxo da fase líquida.

KASSAM *et al.* (2002), no entanto, ressaltam que é uma linha que pode ser investigada para o tratamento de esgotos domésticos, na medida em que a coleta de gases em mais estágios pode reduzir a turbulência causada pela fase gasosa e melhorar a retenção de sólidos no sistema.

Outra versão de reator UASB modificado foi desenvolvida pela Biothane, chamada BIOTHANE UASB®. Esta criou uma configuração que permite a comunicação do interior do separador trifásico com a zona de decantação (evitando a formação excessiva de espuma naquele), mediante inserção de placas defletoras, que criam correntes para permitir que ocorra a liberação das bolhas de gás presas no interior dos grânulos de lodo (PEREIRA, 2007). Segundo KASSAM *et al.* (2002), em pesquisa efetuada com efluentes industriais, este reator é capaz de operar bem com cargas orgânicas da ordem de 10 a 15 kgDQO/m³.d, e curtos tempos de detenção hidráulica. A Figura 11 apresenta os dois modelos descritos acima.

Figura 11. BIOTHANE UASB®. e BIOPAQ UASB®. Fonte: Biothane Corporation (2014); Adaptado de Veolia Water Systems (2014).

Por fim, outra adaptação do reator UASB foi proposta por Cavalcanti (2003). A autora propôs a colocação de placas na parte superior na região de decantação configurando um decantador de alta taxa tal como em alguns decantadores de estações de tratamento de água (PEREIRA, 2007). Ao avaliar o desempenho deste reator com um reator convencional, com TDH variando de 12 a 2 h, os resultados mostraram que as concentrações de DQO efluentes, no reator modificado, foram sempre inferiores, e as idades do lodo, sempre superiores, às de um reator UASB convencional, operado sob as mesmas condições.

Os três exemplos citados demonstram que ainda há um vasto campo de possibilidades de modificações nos reatores UASB, que permitem melhorias no desempenho.

3.6.2. Reator Híbrido

Outra adaptação desenvolvida no reator UASB foi a inserção de anéis plásticos na região de decantação do reator, o chamado reator híbrido. O meio suporte propicia melhor retenção dos sólidos, melhorando o desempenho de separação entre as fases sólida e líquida (PEREIRA, 2007).

Elmitwalli et al. (2002) compararam o desempenho de um reator híbrido com um filtro anaeróbico no tratamento de esgotos domésticos. Verificou-se que a eficiência na remoção de DQO foi inferior no primeiro, considerando condições de TDH de 4 h e temperatura de 13°C. Nestas condições, portanto, o filtro anaeróbico seria mais

recomendando. Mas os autores reforçam a necessidade de realização de mais pesquisas com reatores adaptados como este.

3.6.3. Outras Alterações

Muitas outras modificações aos reatores UASB foram propostas, tais quais: a utilização de câmaras em paralelo (KATO et al., 1999); câmaras em série (KATO et al., 1999; HALALSHEH et al., 2005); reator de leito fluidizado (CAMPOS & PEREIRA, 1999); reator de leito granular expandido (SEGHEZZO et al., 1998; VAN HAANDEL et al., 2006); e reator hidrolítico (KATO et al., 1999).

No entanto, de modo geral, nenhuma dessas está relacionada diretamente a modificações no separador trifásico de um reator convencional, não estando, portanto, vinculadas ao presente estudo.

3.6.4. Remoção do Separador Trifásico

Por fim, o único exemplo no Brasil de reator UASB, em escala real, operando sem o separador trifásico, é a ETE Lageado, em Botucatu – SP. A Figura 12 apresenta uma vista superior da ETE:

Figura 12. Vista Superior da ETE Lageado, em Botucatu – SP.

Resumidamente, ETE é composta pelas seguintes unidades de tratamento:

- Tratamento Preliminar;
- RALFs (reator anaeróbio de lodo fluidizado);
- Tanques de Aeração;
- Decantadores Secundários.

Após a quebra dos separadores trifásicos dos UASBs, em 2014, devido ao acúmulo de espuma na estrutura, a estação realizou a remoção delas e começou a operar sem o separador trifásico. Embora o acesso aos dados operacionais para o presente trabalho tenha sido restrito, os resultados operacionais parecem ser bastante motivadores no sentido da adoção dessa prática, quando pertinente. Alguns dados de concentração de DBO afluente e efluente aos RALFs, de coletas pontuais do mês de março de 2014, são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2. Resultados Operacionais de DBO_{5,20} da ETE Lageado, em Botucatu (Fonte: SABESP).

Coleta	DBO Esgoto Afluente ao UASB (mg/L)	DBO Efluente Tratado do UASB (mg/L)	Remoção (%)
1	210	80	61,9
2	330	105	68,2
3	330	90	72,7
4	300	75	75,0
5	130	100	23,1
Média	260	90	60,2
Máximo	330	105	75,0
Mínimo	130	75	23,1
Desvio Padrão	88	13	21,3

Observa-se que, no mês de março, a ETE Lageado operou com eficiência razoável na remoção de DBO, acima de 60% em média, e com valor máximo elevado, de 75,0%. Os resultados são comparáveis a reatores convencionais.

A perda de sólidos também parece não ter sido significativa, com exceção do início do mês, como pode ser observado no Figura 13:

Figura 13. Perfil de Sólidos Sedimentáveis no Efluente dos RALFs, no Mês de Março/2014, na ETE Lageado, em Botucatu (Fonte: SABESP).

Observa-se que, no início do mês, a perda de sólidos foi considerável. No entanto, ela sofreu uma redução significativa ao final do mês. Cabe citar, no entanto, que, mesmo com perda de sólidos alta, a estação é constituída por lodos ativados como pós-tratamento. O lodo em excesso produzido no sistema é recirculado para os reatores anaeróbios, com o propósito de sofrer uma digestão parcial e adensamento. Desta maneira, resultados mais completos parecem sugerir que os sólidos perdidos com o efluente nesta ETE são recuperados com essa recirculação de lodo.

Desejava-se, a princípio, obter mais dados desta estação, visando compreender com mais detalhes os efeitos da remoção do separador trifásico no reator. No entanto, devido a outros problemas operacionais, a estação tem obtido resultados negativos, não podendo ser utilizada, nesse momento, como parâmetro para averiguar esses efeitos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. UNIDADES EM ESCALA PILOTO UTILIZADAS

O esgoto bruto utilizado para a pesquisa provém do Conjunto Residencial da Universidade de São Paulo (CRUSP). O reator UASB utilizado para a pesquisa, em escala piloto, está localizado no CTH (Centro Tecnológico de Hidráulica), nas dependências da universidade. Para as análises laboratoriais, estão sendo aproveitadas as estruturas do Laboratório de Saneamento Prof. Dr. Lucas Nogueira Garcez, da Escola Politécnica da USP.

O sistema de tratamento utilizado nesta pesquisa é composto pelas seguintes unidades:

- Elevatória de Esgoto Bruto, localizado em área adjacente ao CRUSP;
- Grade escalar mecanizada (step screen) da marca MEVA, com abertura de 6 mm, localizada já na área da unidade piloto;
- Caixa de areia tipo canal com velocidade constante, controlada por calha Parshall;
- Tanque de Recebimento de Esgoto, cuja função é possibilitar a manutenção de um nível mínimo de esgoto para o recalque das bombas da elevatória de recuperação de nível. Em determinado nível mínimo, as bombas são desligadas;
- Elevatória de recuperação de nível, com bomba de deslocamento positivo, da marca Netzsch, de velocidade variável, controlada por variador de frequência; e
- Reator UASB, com volume útil de 24,5 m³, diâmetro de 2,5 m e altura útil de 5 m, com pontos de amostragem de lodo de 0,4 m em 0,4 m a partir do fundo.

A Figura 14 apresenta um desenho esquemático das unidades descritas acima:

Figura 14. Desenho Esquemático do Sistema de Tratamento de Esgoto Piloto.

Para facilitar a visualização das unidades descritas, as figuras abaixo apresentam fotos de algumas das unidades:

Figura 15. Vista superior do reator, com as calhas de coleta de efluente e sem o separador trifásico (Fonte: Próprio Autor).

Figura 16. Tubulações de amostragem de lodo (Fonte: Próprio Autor).

Figura 17. Tratamento Preliminar
(Fonte: Próprio Autor).

Figura 18. EE de Esgoto Bruto (Fonte: Próprio Autor).

Basicamente, conforme observado na Figura 17, o esgoto bruto passa por um tratamento preliminar, que consiste em uma grade escalar mecanizada com espaçamento de 6 mm e uma caixa de areia do tipo canal. Esta etapa tem como finalidade remover sólidos (em grande parte inertes) que podem prejudicar a digestão anaeróbia no reator, formando zonas mortas e caminhos preferenciais, diminuindo o volume de biomassa no sistema e a eficiência do processo de tratamento.

Após esta etapa, o esgoto é encaminhado a um Tanque de Recebimento de Esgoto, de onde é recalcado, por meio de uma bomba de deslocamento positivo, para uma estrutura de entrada no reator, conforme apresentado na figura abaixo:

Figura 19. Estrutura de Entrada no Reator (Fonte: Próprio Autor).

O esgoto então desce por uma tubulação única, que entra no fundo do reator e de onde o esgoto é descarregado na região central inferior do reator. Esta tubulação apresenta um desvio (um by-pass), regulado por uma válvula esfera, caso seja necessário o

esvaziamento do reator ou a manutenção da tubulação de entrada. A Figura 20 e a Figura 21 ilustram o que foi descrito:

Figura 20. Tubulação de Entrada
(Fonte: Próprio Autor).

Figura 21. By-Pass do Reator e
Tubulação de Entrada (Fonte: Próprio
Autor).

A partir do fundo, o fluxo de esgoto desloca-se para cima, no sentido das quatro canaletas de saída. Estas, por sua vez, conduzem o efluente a um canal de saída periférico, onde o efluente é descarregado em um tubo e, posteriormente, na rede de esgoto da SABESP.

Como já citado no Item 2.1, foi retirado o separador trifásico do reator piloto, de modo a se estudar uma configuração inédita. Outras estruturas removidas foram os retentores de espuma, visando facilitar a operação do reator e de acordo com as práticas recentes em muitas ETES. Embora estas estruturas tenham sido removidas, algumas outras foram mantidas, tais quais as canaletas de saída, o canal de saída e uma pequena estrutura metálica, onde se apoiava anteriormente o separador trifásico. As figuras a seguir mostram as estruturas citadas:

Figura 22. Estrutura Metálica Onde se Apoiava Anteriormente o Separador Trifásico (Fonte: Próprio Autor).

Figura 23. Canaletas de Coleta do Efluente (4, no Total) e Canal de Saída (Periférico) (Fonte: Próprio Autor).

Figura 24. Canaletas de Coleta do Efluente sem Retentores de Escuma (Fonte: Próprio Autor).

Acima das canaletas de saída, não há nenhuma estrutura que vede o reator superiormente, ou seja, ele é aberto. Desta maneira, os gases produzidos no processo de digestão anaeróbia são liberados diretamente para a atmosfera.

4.2. PARTIDA DO REATOR UASB

A partida do reator UASB foi realizada no mês de dezembro de 2013. O reator foi inoculado com 6 m³ de lodo (SVT $\approx$ 3,0 kg.m⁻³) proveniente de unidade em escala real, localizada no município de Cotia. Em seguida, foi iniciada a alimentação com a vazão de 1,53 m³.h⁻¹, para manter um Tempo de Detenção Hidráulica de 16 horas no reator.

Conforme será comentado no tópico seguinte, a pesquisa foi subdividida em 4 fases operacionais. Na terceira etapa, parcela considerável do lodo foi descarregada com o efluente final. Desta maneira, no mês de maio de 2015, o reator teve de ser novamente inoculado com 6 m³ de lodo (SVT $\approx$ 3,0 kg.m³), proveniente da ETE de Várzea Paulista.

As figuras a seguir apresentam fotos do segundo carregamento do reator, com lodo da ETE de Várzea Paulista.

Figura 25. Caminhão com 8 m³ de Lodo de UASB.

Figura 26. Carregamento do Reator com Lodo de UASB.

4.3. DEFINIÇÃO DAS FASES EXPERIMENTAIS

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram definidas 4 fases operacionais, em função do TDH. A Tabela 3 apresenta os períodos de realização de cada fase operacional, bem como as vazões de bombeamento para o reator, os TDH resultantes e as velocidades ascensionais:

Tabela 3. Fases operacionais estabelecidas.

Fase	Período	Q (m³.h⁻¹)	TDH (h)	V_{ASC} (m.h⁻¹)
1	19/12/2013 – 13/02/2014	1,53	16	0,31
2	20/03/2014 – 15/05/2014	2,04	12	0,42
3	22/05/2014 – 29/01/2015	2,45	10	0,50
4	01/06/2015 – 26/08/2015	3,06	8	0,62

Convém citar que a norma NBR 12.209/2011 estabelece as seguintes diretrizes para o dimensionamento de um reator UASB padrão, no que concerne à velocidade ascensional:

- A velocidade ascensional no compartimento de digestão do reator deve ser igual ou inferior a 0,7 m/h para a vazão média e inferior a 1,2 m/h para a vazão máxima.
- A velocidade de passagem do compartimento de digestão para o de decantação deve ser igual ou inferior a 2,5 m/h, para a vazão média e a 4,0m/h para a vazão máxima.

Neste caso, para qualquer tempo de detenção hidráulica estudada, as diretrizes apresentadas na norma são satisfeitas. Em especial, para o tempo de detenção hidráulica de 8 horas, a velocidade ascensional se aproxima do máximo estabelecido para a vazão média na zona de digestão.

Como o separador trifásico foi removido do reator piloto, a segunda diretriz, relativa à velocidade de passagem no compartimento de digestão, não se aplica ao presente caso.

Na última fase operacional, foi estabelecido um regime de vazões, visando aproximar a operação do reator às variações reais observadas em uma ETE tratando esgoto doméstico. Desta maneira, foram aplicados dois picos de vazão por dia, com valor de 1,8 vezes a vazão máxima (valor correspondente à multiplicação de K_1 vezes K_2): o primeiro, das 11:00 às 13:00, e o segundo, das 18:00 às 20:00. A Figura 27 apresenta o regime de vazões aplicado ao reator:

Figura 27. Regime de Vazões de Aplicado ao Reator na Fase 4.

Cabe citar que esse regime teve de ser alterado em alguns períodos, devido ao baixo nível de esgoto no Tanque de Recebimento de Esgoto. O desligamento da bomba de recalque era realizado automaticamente por meio de uma boia de nível, de modo a proteger o equipamento.

A mudança na vazão de recalque para o reator nos dois picos de vazão diários era realizada manualmente, alterando-se o valor apresentado no painel do variador de frequência.

Como pode ser observado na Tabela 3, as fases 1 e 2 tiveram duração aproximada de 3 meses; a fase 3, de 8 meses, devido ao fato de que a biomassa foi perdida com o efluente, e aguardou-se a possibilidade de recuperação do lodo no reator; e a fase 4 teve duração de aproximadamente 3 meses, tal qual as duas primeiras fases.

4.4. PARÂMETROS DE MONITORAMENTO

O seguinte programa de controle laboratorial, apresentado na Tabela 4, foi imposto ao reator nas 3 primeiras fases:

Tabela 4. Variáveis monitoradas, pontos de amostragem e frequência das análises – Fases 1, 2 e 3.

Variável	Pontos de Amostragem	Frequência
DQO (total e filtrada)	1 e 3	1 x por semana
Sólidos em Suspensão Totais	1, 2 e 3	1 x por semana
Sólidos Sedimentáveis	1 e 3	2 x por semana
pH	1 e 3	2 x por semana
Alcalinidade	1 e 3	1 x por semana
AOV	3	1 x por semana

OBS: 1: Afluente; 2: Lodo ao longo do perfil e 3: Efluente

Apenas a partir de janeiro de 2015, foi iniciada a análise de DQO filtrada do efluente, devido ao fato de a DQO do efluente tratado estar apresentando resultados muito elevados.

Na última etapa da pesquisa, as análises foram ampliadas, de maneira a avaliar com mais detalhes o comportamento do reator. O programa de controle laboratorial adotado na última etapa é apresentado a seguir:

Tabela 5. Variáveis monitoradas, pontos de amostragem e frequência das análises – Fase 4.

Variável	Pontos de Amostragem	Frequência
DQO (total e filtrada)	1 e 3	2 x por semana
Sólidos em Suspensão Totais	1, 2 e 3	2 x por semana
Sólidos em Suspensão Voláteis	1, 2 e 3	2 x por semana
pH	1 e 3	2 x por semana
Alcalinidade	1 e 3	1 x por semana
AOV	3	2 x por semana

OBS: 1: Afluente; 2: Lodo ao longo do perfil e 3: Efluente

É importante citar que, dado o novo regime de vazões na Fase 4, a coleta de uma amostra do efluente, com respectiva análise de sólidos, foi realizada sempre antes e depois do segundo pico de vazão. Ou seja, coletava-se uma amostra às 18:00 e uma às 20:00. A amostra do esgoto bruto, no entanto, foi coletada apenas às 18:00.

Visando ainda aperfeiçoar a pesquisa, foram realizadas 5 coletas automáticas do esgoto bruto ao longo da última fase, analisando-se três parâmetros: pH, alcalinidade e DQO. O intuito desse monitoramento foi averiguar o comportamento qualitativo do esgoto bruto e o impacto das variações de qualidade nas conclusões da pesquisa. As coletas foram realizadas durante o período diurno, com duração aproximada de 12 horas, tempo de duração da bateria do equipamento.

No que concerne às análises de sólidos, o reator apresenta 8 tubulações de amostragem de lodo, com diâmetro de 100 mm, de Ferro Dúctil, igualmente espaçadas verticalmente, de 0,4 em 0,4 m. No entanto, a primeira e a última tubulações estavam obstruídas durante as três primeiras fases operacionais; antes de iniciar a última fase, ambas foram desobstruídas. A Figura 28 apresenta um desenho esquemático com a posição das tubulações citadas:

Figura 28. Tubulações de Amostragem de Lodo do Reator UASB.

No momento da coleta, deixava-se escorrer o lodo das tubulações por, aproximadamente, 30 segundos, visando remover o lodo possivelmente adensado nas tubulações e produzir resultados nas análises mais condizentes com o perfil de sólidos da manta de lodo do reator.

Ao longo de todo o período de operação, não foi realizado nenhum descarte de lodo do reator.

Por fim, todas as análises foram realizadas de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22ª edição, conforme descrição abaixo:

- DQO – Método do Refluxo Aberto (5220 B), com diluição da amostra de 25% em água destilada e titulação com solução de sulfato ferroso amoniacal 0,25M até a viragem de verde para marrom avermelhado.
- Série de Sólidos – Método Gravimétrico (2540 B e 2540 E), com manutenção das amostras por 24 horas em estufa a 105°C e por 60 minutos em mufla a 550°C.
- pH – Medição automática por equipamento Hexas, modelo 720A.
- Alcalinidade – Método por Titulação Potenciométrica (2320 B)
- AOV – Método por Titulação Simplificado (5560 C)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do estudo foram subdivididos em tópicos. O primeiro discorre a respeito dos resultados de teor de sólidos totais e voláteis ao longo da manta de lodo. O segundo é relacionado à espuma produzida ao longo do período de operação. O terceiro concerne à amostragem automática efetuada com o esgoto bruto na última fase operacional. E o último discorre sobre os resultados das análises de pH, alcalinidade, AOV, sólidos sedimentáveis, teor de sólidos totais e voláteis e, principalmente, DQO.

5.1. MANTO DE LODO

Na Tabela 6, são apresentados os resultados dos teores de sólidos no lodo ao longo da profundidade do reator UASB nas Fases 1, 2 e 3. Estes resultados foram lançados na Figura 29.

Tabela 6. Teor de sólidos (%) no lodo ao longo da altura do reator UASB – Fases 1, 2 e 3.

Fase	Data	0,4 m	0,8 m	1,2 m	1,6 m	2,0 m	2,4 m	2,8 m	3,2 m
1 (3 amostras p/ tubulação)	19/12/2013	-	9,12	9,41	1,24	0,08	0,01	0,05	-
	06/02/2014	-	-	0,47	3,53	0,44	0,02	0,01	-
	13/02/2014	-	13,06	0,73	8,39	0,44	0,03	0,00	-
2 (6 amostras por tubulação)	27/03/2014	-	4,29	0,40	0,33	2,67	0,05	0,04	-
	17/04/2014	-	2,50	4,38	-	-	-	-	-
	20/03/2014	-	0,07	1,34	0,96	2,83	0,02	0,08	-
	24/04/2014	-	0,19	0,07	0,09	0,08	0,04	0,05	-
	08/05/2014	-	6,38	0,06	6,21	0,09	0,06	0,06	-
	15/05/2014	-	6,54	6,39	0,21	0,23	0,19	0,19	-
3 (14 amostras por tubulação)	22/05/2014	-	0,06	0,05	0,06	0,13	0,05	0,04	-
	29/05/2014	-	0,37	0,44	0,05	0,06	0,04	-	-
	19/6/2014	-	3,59	0,31	0,14	0,07	0,05	0,04	-
	26/6/2014	-	0,55	0,25	0,07	0,17	0,03	0,04	-
	3/7/2014	-	0,13	0,06	0,06	0,08	0,04	0,04	-
	17/7/2014	-	0,18	0,09	0,09	0,06	0,05	0,06	-
	31/7/2014	-	0,08	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	-
	7/8/2014	-	0,04	0,10	0,05	0,04	0,03	0,03	-
	21/8/2014	-	0,04	0,06	0,06	0,03	0,03	0,03	-
	30/8/2014	-	0,05	0,07	0,07	0,03	0,04	0,03	-
	08/01/2015	-	6,49	3,99	0,55	0,36	0,06	0,04	-
	15/01/2015	-	4,55	-	0,31	0,47	0,04	0,04	-
	22/01/2015	-	1,08	0,49	0,12	0,16	0,08	0,06	-
	29/01/2015	-	1,71	0,88	0,21	0,23	0,07	0,05	-

Figura 29. Séries históricas do teor de sólidos ao longo da altura do manto de lodo – Fases 1, 2 e 3.

Com base na Figura 29, observa-se a redução progressiva do teor de sólidos do manto de lodo ao longo da altura do reator, decorrente de arraste de sólidos excessivo com o efluente. No período inicial de operação do reator (TDH = 16 h), o teor de sólidos no fundo era bastante elevado, tendo superado, em uma das análises pontuais, o valor de 12%. Com a redução do TDH, nas etapas consecutivas, o teor de sólidos reduziu sensivelmente, apresentando-se, no entanto, ainda em valores elevados na etapa com TDH de 12 h. A redução mais drástica ocorreu quando do início da operação da terceira etapa, com TDH de 10 h, quando os valores obtidos de teor de sólidos situaram-se abaixo de 1,0%. Isto resulta de um excessivo arraste de sólidos, com uma consequente elevada redução no teor de sólidos do lodo.

Os resultados da Fase 4 estão apresentados separadamente das fases anteriores, na Tabela 7 e na Tabela 8. O motivo para tal procedimento é que, entre a terceira e última fases, houve um novo carregamento do reator com lodo proveniente de outra ETE. Os resultados foram lançados em gráfico na Figura 30 e na Figura 31:

Tabela 7. Teor de sólidos (%) no lodo ao longo da altura do reator UASB – Fases 4 (Horário de Coleta – 18:00).

Fase	Data	0,4 m	0,8 m	1,2 m	1,6 m	2,0 m	2,4 m	2,8 m	3,2 m
4 (12 amostras por tubulação)	01/06/2015	0,55	0,20	0,15	4,01	4,06	1,87	2,16	4,32
	03/06/2015	-	1,79	1,78	4,07	3,50	4,11	3,25	3,46
	10/06/2015	4,31	0,68	0,24	0,18	4,74	3,96	3,96	0,44
	17/06/2015	6,21	0,75	0,15	5,08	4,80	2,90	4,66	0,56
	22/06/2015	0,89	0,36	0,13	0,90	5,51	5,17	5,83	0,32
	24/06/2015	0,21	0,18	0,28	0,53	1,48	3,83	5,07	3,41
	29/06/2015	0,73	0,19	0,12	1,49	2,30	0,80	1,48	0,97
	13/07/2015	3,29	0,17	0,07	1,23	3,61	0,96	0,20	0,87
	15/07/2015	1,98	0,19	0,07	3,91	2,08	0,34	1,10	6,07
	22/07/2015	1,90	0,27	0,35	5,68	3,50	2,66	0,44	1,79
	19/08/2015	1,80	0,24	0,09	3,21	3,46	2,66	0,37	1,01
	26/08/2015	1,67	0,17	0,10	4,01	3,41	2,34	0,48	0,87
	Média	2,14%	0,43%	0,29%	2,86%	3,54%	2,63%	2,42%	2,01%
	Máximo	6,21%	1,79%	1,78%	5,68%	5,51%	5,17%	5,83%	6,07%
	Mínimo	0,21%	0,17%	0,07%	0,18%	1,48%	0,34%	0,20%	0,32%
	Desv. Pad.	1,81%	0,47%	0,47%	1,89%	1,17%	1,48%	2,05%	1,86%

Tabela 8. Teor de sólidos (%) no lodo ao longo da altura do reator UASB – Fase 4 (Horário de Coleta – 20:00).

Fase	Data	0,4 m	0,8 m	1,2 m	1,6 m	2,0 m	2,4 m	2,8 m	3,2 m
4 (12 amostras por tubulação)	01/06/2015	0,75	0,14	0,13	3,60	2,96	0,28	2,35	2,95
	03/06/2015	-	0,60	1,91	4,06	4,03	4,59	3,61	1,21
	10/06/2015	1,07	0,09	0,15	4,32	4,70	2,89	4,06	0,26
	17/06/2015	8,90	0,10	0,12	6,23	5,01	4,40	4,40	0,23
	22/06/2015	0,19	0,18	0,15	0,55	5,62	4,54	4,74	3,04
	24/06/2015	0,73	0,17	0,24	2,19	2,36	1,32	4,11	0,74
	29/06/2015	0,29	0,22	0,12	0,18	2,37	0,54	0,40	1,40
	13/07/2015	1,21	0,14	0,08	3,33	2,45	1,22	0,89	3,18
	15/07/2015	0,07	0,76	0,15	0,09	0,97	1,73	0,86	1,74
	22/07/2015	1,04	0,19	0,16	3,95	4,21	2,45	2,87	4,08
	19/08/2015	0,61	0,12	0,15	1,23	3,67	2,01	2,75	3,25
	26/08/2015	0,07	0,75	0,15	1,40	2,66	1,64	2,79	3,45
	Média	1,36%	0,29%	0,29%	2,59%	3,42%	2,30%	2,82%	2,13%
	Máximo	8,90%	0,76%	1,91%	6,23%	5,62%	4,59%	4,74%	4,08%
	Mínimo	0,07%	0,09%	0,08%	0,09%	0,97%	0,28%	0,40%	0,23%
	Desv. Pad.	2,54%	0,25%	0,51%	1,94%	1,35%	1,51%	1,47%	1,35%

Figura 30. Séries históricas do teor de sólidos ao longo da altura do manto de lodo - Fase 4 (Horário da Coleta – 18:00).

Figura 31. Séries históricas do teor de sólidos ao longo da altura do manto de lodo - Fase 4 (Horário de Coleta – 20:00).

Na Fase 4, observa-se que, ao longo do período de operação, houve variações pouco previsíveis ao longo da manta, tornando necessária, desta maneira, uma análise mais cuidadosa dos resultados. Observa-se que o maior intervalo de valores foi obtido nas duas tubulações extremas, a 0,4 m e a 3,2 m. Isso provavelmente é decorrente desta faixa ser muito sujeita às variações de vazão impostas sobre o reator. A tubulação de amostragem a 0,4 m, por exemplo, fica muito próxima da tubulação de vazão afluente ao reator, onde o fluxo ainda não se homogeneizou ao longo da seção no reator. Semelhantemente, a tubulação a 3,2 m sofre influência da estrutura que antes apoiava o separador trifásico. Provavelmente ali deve haver um acúmulo grande de espuma (como pode ser observado diversas vezes nas coletas de lodo). Além disso, o fluxo de esgoto

no reator sofre variações por conta dessa estrutura, sujeitando este ponto de amostragem a variações mais extremas que os pontos intermediários.

Observa-se também que, no início da operação, os teores de sólidos mais altos estavam, de maneira geral, distribuídos ao longo do reator, com picos que chegaram a 8,9% no ponto a 0,4 m e a 6,23% a 1,6 m; mas, ao final de operação, estavam na zona superior, próximo ao antigo apoio do separador trifásico.

Em relação ao teor de sólidos médio, os pontos que apresentaram valores mais elevados foram os localizados a 1,6 m, 2,0 m, 2,4 m e 2,8 m do piso, embora o desvio padrão tenha sido elevado também nesses pontos.

De maneira geral, os teores de sólidos situaram-se na faixa de 1,0 a 4,0%, com exceção de alguns valores pontuais, principalmente no mês de junho, primeiro mês de operação. Essa faixa é parcialmente condizente com os valores encontrados normalmente em reatores UASB convencionais, de 3,0 a 5,0% (JORDÃO E PÊSSOA, 2011).

A Tabela 9 e a Tabela 10 apresentam os resultados dos teores de sólidos voláteis no lodo do UASB, para os dois horários de coleta:

Tabela 9. Teor de sólidos voláteis (%) no lodo ao longo da altura do reator UASB – Fases 4 (18:00).

Data	0,4 m	0,8 m	1,2 m	1,6 m	2,0 m	2,4 m	2,8 m	3,2 m
01/06/2015	-	0,14	0,11	3,15	3,27	1,50	1,70	3,41
03/06/2015	-	1,11	1,11	2,43	2,13	2,30	2,09	2,14
10/06/2015	2,77	0,46	0,14	0,11	3,00	2,63	2,55	0,25
17/06/2015	4,77	0,16	0,12	3,50	3,18	1,93	3,13	0,35
22/06/2015	0,70	0,24	0,07	0,65	3,92	3,87	4,15	0,20
24/06/2015	0,15	0,15	0,19	0,66	1,20	2,95	3,88	2,70
29/06/2015	0,57	0,13	0,07	1,16	1,78	0,62	1,17	0,77
13/07/2015	2,63	0,12	0,03	0,96	2,87	0,75	0,14	0,68
15/07/2015	1,57	0,14	0,04	3,21	1,65	0,23	1,05	3,53
22/07/2015	1,56	0,21	0,32	4,51	2,78	2,12	0,32	1,43
19/08/2015	1,69	0,17	0,03	3,07	2,07	1,74	0,30	0,46
26/08/2015	1,36	0,13	0,07	3,43	2,71	1,87	0,15	0,66

Tabela 10. Teor de sólidos voláteis (%) no lodo ao longo da altura do reator UASB – Fases 4 (20:00)

Data	0,4 m	0,8 m	1,2 m	1,6 m	2,0 m	2,4 m	2,8 m	3,2 m
01/06/2015	0,60	0,10	0,09	3,05	2,37	0,21	1,90	2,36
03/06/2015	-	0,38	1,21	2,45	2,48	2,59	2,28	0,71
10/06/2015	0,46	0,06	0,09	2,92	3,02	1,91	2,67	0,13
17/06/2015	6,65	0,07	0,07	4,50	3,42	3,16	3,16	0,15
22/06/2015	0,13	0,12	0,10	0,38	4,21	3,50	3,53	2,35
24/06/2015	0,57	0,11	0,16	1,71	1,77	1,04	3,15	0,57
29/06/2015	0,21	0,17	0,07	0,11	1,87	0,41	0,27	1,10
13/07/2015	0,98	0,10	0,04	2,65	1,96	0,96	0,70	2,52
15/07/2015	0,04	0,68	0,11	0,06	2,09	1,39	0,67	1,41
22/07/2015	0,83	0,14	0,11	3,16	3,36	1,98	2,24	3,31
19/08/2015	0,53	0,08	0,12	0,77	1,99	1,50	1,66	2,56
26/08/2015	0,04	0,67	0,10	1,11	1,54	1,22	1,66	2,67

Para facilitar a compreensão dos resultados, foi calculada a relação SV/ST, de maneira a se saber a proporcionalidade entre os valores obtidos. Esses resultados são apresentados nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11. Relação SV/ST no lodo ao longo da altura do reator UASB – Fase 4 (18:00).

Data	0,4 m	0,8 m	1,2 m	1,6 m	2,0 m	2,4 m	2,8 m	3,2 m
01/06/2015	-	0,72	0,70	0,79	0,80	0,80	0,79	0,79
03/06/2015	-	0,62	0,62	0,60	0,61	0,56	0,64	0,62
10/06/2015	0,64	0,67	0,61	0,61	0,63	0,66	0,64	0,58
17/06/2015	0,77	0,22	0,75	0,69	0,66	0,67	0,67	0,62
22/06/2015	0,79	0,66	0,59	0,73	0,71	0,75	0,71	0,62
24/06/2015	0,69	0,85	0,69	-	0,81	0,77	0,77	0,79
29/06/2015	0,78	0,69	0,58	0,78	0,78	0,77	0,79	0,79
13/07/2015	0,80	0,71	0,47	0,78	0,80	0,79	0,68	0,78
15/07/2015	0,80	0,74	0,57	0,82	0,79	0,69	0,95	0,58
22/07/2015	0,82	0,78	0,89	0,79	0,79	0,80	0,73	0,80
19/08/2015	0,94	0,70	0,30	0,95	0,60	0,65	0,81	0,45
26/08/2015	0,81	0,79	0,78	0,86	0,79	0,80	0,31	0,75
Média	0,78	0,68	0,63	0,76	0,73	0,73	0,71	0,68
Máximo	0,94	0,85	0,89	0,95	0,81	0,80	0,95	0,80
Mínimo	0,64	0,22	0,30	0,60	0,60	0,56	0,31	0,45
Desvio Padrão	0,08	0,16	0,15	0,10	0,08	0,08	0,15	0,12

Tabela 12. Relação SV/ST no lodo ao longo da altura do reator UASB – Fase 4 (20:00).

Data	0,4 m	0,8 m	1,2 m	1,6 m	2,0 m	2,4 m	2,8 m	3,2 m
01/06/2015	0,79	0,70	0,68	0,85	0,80	0,76	0,81	0,80
03/06/2015	-	0,64	0,63	0,60	0,61	0,56	0,63	0,59
10/06/2015	0,43	0,69	0,59	0,68	0,64	0,66	0,66	0,50
17/06/2015	0,75	0,65	0,61	0,72	0,68	0,72	0,72	0,64
22/06/2015	0,67	0,65	0,63	0,69	0,75	0,77	0,74	0,77
24/06/2015	0,78	0,67	0,65	0,78	0,75	0,79	0,77	0,77
29/06/2015	0,75	0,74	0,59	0,65	0,79	0,75	0,68	0,78
13/07/2015	0,81	0,72	0,59	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79
15/07/2015	0,61	0,89	0,74	0,64	-	0,80	0,79	0,81
22/07/2015	0,80	0,76	0,70	0,80	0,80	0,81	0,78	0,81
19/08/2015	0,86	0,72	0,75	0,63	0,54	0,75	0,60	0,79
26/08/2015	0,56	0,90	0,67	0,80	0,58	0,74	0,59	0,77
Média	0,71	0,73	0,65	0,72	0,70	0,74	0,71	0,74
Máximo	0,86	0,90	0,75	0,85	0,80	0,81	0,81	0,81
Mínimo	0,43	0,64	0,59	0,60	0,54	0,56	0,59	0,50
Desvio Padrão	0,13	0,09	0,06	0,08	0,10	0,07	0,08	0,10

Por fim, os resultados obtidos foram plotados em gráficos do tipo Box-Whiskers, de maneira a facilitar a visualização, conforme apresentado na Figura 32:

Figura 32. Diagramas Box-Whiskers da Relação SV/ST do Lodo, ao Longo da Altura do Reator.

Observa-se que, em todos os pontos de amostragem, a relação SV/ST situou-se, de modo geral, na faixa de 0,60 a 0,80, o que indica que o lodo apresenta características

predominantemente orgânicas, como de um lodo biológico não estabilizado. Esses valores não fundamentam os resultados obtidos para a DQO, como será visto no Item 5.4.

5.2. ESCUMA

Ao longo de toda a operação, mesmo com a retirada dos retentores de espuma, houve grande acúmulo de espuma na superfície do reator. Esperava-se, com a remoção do separador trifásico, que a formação de espuma na superfície fosse reduzida, devido à maior facilidade de escoamento dela com o efluente final. No entanto, foi necessária a retirada manual da espuma durante todo o período de operação. Uma possível explicação é que as canaletas coletoras de efluente estavam desniveladas, funcionando, portanto, como retentores de espuma, na prática.

A Figura 33 apresenta fotos da espuma acumulada na superfície do reator, tiradas durante a Fase 4:

Figura 33. Espuma Visualizada na Superfície do Reator (Fonte: Próprio Autor).

5.3. COLETA AUTOMÁTICA DO ESGOTO BRUTO

Abaixo, nas Tabelas 13, 14 e 15, são apresentados os resultados obtidos no monitoramento automático do esgoto bruto. Esses resultados foram plotados sucessivamente na Figura 34, Figura 35 e Figura 36.

Tabela 13. pH no Esgoto Bruto (Amostras da Coleta Automática).

Data	pH					
	25/jun	16/jul	23/jul	12/ago	26/ago	Média
06:00	7,73	7,10	6,14	7,31	7,52	7,16
07:00	7,59	7,23	6,41	7,20	7,13	7,11
08:00	7,17	6,63	6,08	6,42	6,78	6,62
09:00	6,79	6,92	6,33	7,49	6,34	6,77
10:00	6,52	-	6,98	6,65	6,79	6,74
11:00	6,43	-	6,79	6,61	6,57	6,60
12:00	6,78	6,43	5,88	7,24	6,98	6,66
13:00	6,92	6,45	6,83	6,18	6,71	6,62
14:00	7,13	6,81	6,29	6,47	6,39	6,62
15:00	7,04	6,22	6,37	6,30	6,34	6,45
16:00	5,92	6,00	5,61	-	6,01	5,89
17:00	6,32	6,23	6,19	-	6,45	6,30

Figura 34. Perfil do Valor Médio de pH no Esgoto Bruto (Amostras da Coleta Automática).

Tabela 14. Alcalinidade no Esgoto Bruto (Amostras da Coleta Automática).

Data	Alcalinidade					
	25/jun	16/jul	23/jul	12/ago	26/ago	Média
06:00	568	356	259	371	348	380
07:00	550	379	268	454	361	402
08:00	486	434	231	448	388	397
09:00	411	405	331	538	444	426
10:00	381	-	450	360	431	406
11:00	366	-	364	316	390	359
12:00	378	356	213	344	253	309
13:00	408	321	346	205	246	305
14:00	455	293	253	274	254	306
15:00	398	283	263	213	230	277
16:00	301	239	150	-	228	229
17:00	371	359	270	-	264	316

Figura 35. Perfil do Valor Médio de Alcalinidade no Esgoto Bruto (Amostras da Coleta Automática).

Tabela 15. DQO no Esgoto Bruto (Amostras da Coleta Automática).

Data	DQO					
	25/jun	16/jul	23/jul	12/ago	26/ago	Média
06:00	924	528	708	540	492	638
07:00	1212	780	444	-	816	813
08:00	1344	600	408	-	984	834
09:00	1536	552	732	1092	900	962
10:00	1596	2964	804	1380	1296	1608
11:00	1620	2964	732	1284	1080	1536
12:00	1428	948	1296	924	1152	1150
13:00	1224	876	816	1428	1056	1080
14:00	1104	1080	804	1500	708	1039
15:00	732	600	900	1236	972	888
16:00	924	1020	1464	1296	1104	1162
17:00	840	648	1296	1020	1092	979

Figura 36. Perfil do Valor Médio de DQO no Esgoto Bruto (Amostras da Coleta Automática).

Observa-se que, em relação ao pH, há uma tendência de pico por volta das 10:00 – 11:00, e um ponto mínimo por volta das 16:00. Com exceção de 3 valores pontuais, o pH manteve-se no intervalo de 6,0 a 7,5, demonstrando, de fato, que o esgoto bruto apresenta características de um esgoto comum. A variação de pH, desta maneira, não é tão significativa.

O gráfico da alcalinidade apresenta comportamento muito semelhante ao do pH, com pico às 09:00 e um ponto mínimo às 16:00. A variação dos valores da alcalinidade é mais significativa, variando entre os valores médios máximo e mínimo de 425,75 e 229,38 mg/L (53,9% do valor médio máximo). No entanto, pode-se inferir também que a alcalinidade no esgoto bruto é relativamente alta ao longo de todo o dia.

Por fim, em relação à DQO, observam-se, aparentemente, dois picos ao longo do dia: às 10:00 – 11:00 e às 16:00, com destaque para o primeiro. Esses picos são compatíveis com os horários das refeições no restaurante central do CRUSP, dado o fato de o almoço ser servido à partir das 11:15, e o jantar, à partir das 17:30. O intervalo entre os valores médios também foi bastante significativo, de 638 mg/L (às 06:00) a 1608 mg/L (às 10:00), como já dito, muito provavelmente ao funcionamento do restaurante.

Como implicações diretas dessa avaliação, tem-se que, considerando que as amostras de esgoto bruto para análise de pH, alcalinidade e DQO, eram coletadas, na Fase 4, às 18:00, os valores obtidos nas análises provavelmente eram bastante inferiores aos picos diários desses mesmos parâmetros. Como a coleta do efluente final, para análise de pH, alcalinidade e DQO, também era feita às 18:00, há uma distorção nos resultados, dado o TDH, na Fase 4, ser de 8 h. Embora haja uma distribuição estatística da vazão horária de esgoto efluente às 18:00, observa-se, apenas para uma avaliação simplificada, que 8 hs antes da coleta culmina exatamente no horário com maior pico de DQO, às 10:00.

5.4. AVALIAÇÃO DO pH, ALCALINIDADE, ÁCIDOS VOLÁTEIS E DQO

Nas Tabelas 16 a 19, são apresentados os resultados obtidos com TDH de 16, 12, 10 e 8 horas, respectivamente, totalizando 40 amostras em cada ponto de amostragem.

Tabela 16. Resumo estatístico dos resultados de pH, Alcalinidade, AOV e DQO para Tempo de Detenção Hidráulica de 16 horas.

Parâmetro (6 amostras)	pH		Alcalinidade (*)		AOV(*)	DQO (mg.L⁻¹)	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Saída	Entrada	Saída
Média	7,2	6,8	199	240	43,5	516	176
Máximo	7,5	6,9	228	290	57,6	648	264
Mínimo	7,0	6,7	180	220	28,8	360	120
Desv Pad	0,2	0,1	20	34	14,4	100	51

(*) em mgCaCO₃.L⁻¹

Tabela 17. Resumo estatístico dos resultados de pH, Alcalinidade, AOV e DQO para Tempo de Detenção Hidráulica de 12 horas.

Parâmetro (6 amostras)	pH		Alcalinidade (*)		AOV(*)	DQO (mg.L⁻¹)	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Saída	Entrada	Saída
Média	6,4	6,4	198	291	58	1.015	403
Máximo	6,8	6,7	254	318	101	1404	600
Mínimo	5,9	6,1	126	274	20	840	252
Desv Pad	0,3	0,2	52	16	40	229	175

(*) em mgCaCO₃.L⁻¹

Tabela 18. Resumo estatístico dos resultados de pH, Alcalinidade, AOV e DQO para Tempo de Detenção Hidráulica de 10 horas.

Parâmetro (14 amostras)	pH		Alcalinidade (*)		AOV(*)	DQO (mg.L⁻¹)		
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Saída	Entrada	Saída	Saída (Filtrada)**
Média	6,9	6,7	236	317	30	779	399	321
Máximo	7,8	7,0	345	351	42	1188	636	360
Mínimo	6,4	6,6	175	296	15	84	72	300
Desv Pad	0,5	0,2	51	17	8	360	201	27

(*) em mgCaCO₃.L⁻¹; (**) a análise de DQO filtrada do efluente tratado começou a ser realizada apenas a partir de janeiro de 2015

Tabela 19. Resumo estatístico dos resultados de pH, Alcalinidade, AOV e DQO para Tempo de Detenção Hidráulica de 8 horas.

Parâmetro (14 amostras)	pH		Alcalinidade (*)		AOV(*)	DQO (mg.L ⁻¹)		
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Saída	Entrada	Saída	Saída (Filtrada)**
Média	6,5	6,5	204	283	50,7	1132	962	408
Máximo	7,3	6,9	350	438	130	2412	2232	732
Mínimo	5,5	5,9	73	74	22	828	216	276
Desv Pad	0,5	0,3	92,4	129,6	40,7	440	498	142

(*) em mgCaCO₃.L⁻¹; (**) a análise de DQO filtrada do efluente tratado começou a ser realizada apenas a partir de janeiro de 2015

Os resultados de pH foram lançados na forma de Diagramas Box-Whiskers apresentados na Figura 37, de forma progressiva em relação aos Tempos de Detenção Hidráulica estudados:

Figura 37. Diagramas Box-Whiskers de pH.

Em todos os casos, o pH permaneceu na faixa entre 6,0 e 8,0, da Fase 1 a Fase 3, com exceção de um único valor (5,9), durante a operação em TDH de 12 h. Estes valores são

de especial importância, pois demonstram que o sistema encontrou-se estável, ao menos para este parâmetro. Valores de pH abaixo de 6,0 e superiores a 8,3 podem inibir por completo a atividade das arqueias metanogênicas. As bactérias acidogênicas são menos sensíveis que estas, podendo se mostrar ainda bastante ativas mesmo para valores de pH baixos, como 4,5. Pelos resultados, portanto, é possível dizer que, aparentemente, não houve nenhuma desestabilização significativa do sistema em relação ao parâmetro pH.

Essas conclusões podem ser inferidas também para a quarta fase, embora nesta tenham havido mais pontos (cinco, no total) abaixo do pH de 6,0. No entanto, o valor mínimo obtido foi de 5,54, no dia 29/06/2015, para o esgoto bruto, não muito distante do valor de referência. Para o esgoto tratado, o valor mínimo foi ainda mais próximo, de 5,85, no dia 24/06/2015, indicando, portanto, que o sistema permaneceu estável para este parâmetro, no período de operação da quarta fase.

De maneira semelhante, os resultados de alcalinidade foram lançados na forma de Diagramas Box-Whiskers apresentados na Figura 38, de forma progressiva em relação aos Tempos de Detenção Hidráulica estudados:

Figura 38. Diagramas Box-Whiskers de Alcalinidade.

Nos processos anaeróbios, o monitoramento da alcalinidade é mais importante que a avaliação do pH. Isso se deve à escala logarítmica do pH, significando que pequenos

abaixamentos do pH implicam no consumo de elevada quantidade de alcalinidade, diminuindo a capacidade de tamponamento do meio. Percebe-se, no entanto, que, para os quatro TDHs, a alcalinidade manteve-se em valores médios elevados. Observou-se, inclusive, uma elevação na alcalinidade para o efluente tratado, na medida em que o TDH era reduzido. As três últimas fases apresentaram valores médios, para o efluente tratado, superiores a 250 mg/L, indicando que o sistema encontrou-se estável, com boa capacidade de tamponamento. A maior preocupação residiu na alta variabilidade dos valores, para o efluente tratado, na última fase. Embora, de modo geral, os valores tenham sido elevados, três amostras apresentaram resultados abaixo de 100 mg/L. A causa para este problema está relacionada principalmente à qualidade do esgoto bruto, que também apresentou baixos valores nesses mesmos dias.

Os resultados de AOV foram também lançados na forma de Diagramas Box-Whiskers apresentados na Figura 39, de forma progressiva em relação aos Tempos de Detenção Hidráulica estudados:

Figura 39. Box-Whiskers de Ácidos Orgânicos Voláteis.

A Figura 39 mostra que a concentração de AOV manteve valores médios na faixa de 40 a 60 mg/L nas duas primeiras etapas de TDH. O desvio padrão para a segunda etapa foi substancialmente mais elevado que nas demais. Esse aumento na produção de AOV acompanhou a diminuição do pH nesta mesma etapa. No entanto, ao contrário do que era de se esperar, houve um aumento da alcalinidade do sistema.

Na terceira etapa, para TDH = 10 h, a concentração de AOV reduziu-se significativamente, para valor médio praticamente igual à metade da etapa anterior. Nesta mesma etapa, observou-se novamente elevação do pH e da alcalinidade do sistema, como era de se esperar.

Na última etapa, com TDH = 8 h, a média da concentração de AOV ficou ligeiramente superior à etapa anterior, bem como o desvio padrão. Nesta mesma etapa, observou-se redução do pH, fato já esperado. A alcalinidade, no entanto, apresentou-se muito variável, conforme já discutido em parágrafo anterior.

Analizados paralelamente aos resultados de alcalinidade, os resultados de AOV no reator parecem indicar que o sistema alcançou a última fase do processo anaeróbia, a metanogênese. Este fato pode ser comprovado pelo intenso borbulhamento observado na superfície do reator durante todo o tempo de operação.

Os resultados de DQO foram lançados na forma de Diagramas Box-Whiskers, apresentados na Figura 40, de forma progressiva em relação aos Tempos de Detenção Hidráulica estudados:

Figura 40. Diagramas Box-Whiskers de DQO do Esgoto Bruto e dos Efluentes Tratado e Filtrado.

Pode-se observar que, embora haja uma variabilidade significativa nos valores de DQO do esgoto bruto, os valores médios situaram-se entre 500 e 1.000 mg/L, nas três primeiras fases. Na última fase, houve uma elevação nas concentrações de DQO no esgoto bruto, por motivo desconhecido. É de conhecimento comum, no entanto, que o restaurante da COSEAS apresenta um impacto bastante elevado na qualidade do esgoto bruto, devendo a ele, muito provavelmente, a causa de valores tão extremos.

Apesar de pontualmente, para cada análise, não se conseguir avaliar com profundidade os valores de DQO no efluente tratado, devido ao tempo de detenção no reator, observa-se que nos valores médios houve uma queda significativa na DQO do efluente tratado em relação à DQO do esgoto bruto nas duas primeiras etapas, como já era de se esperar. Na última etapa, no entanto, essa remoção foi pouquíssimo significativa.

Os valores médios de eficiência para as duas primeiras etapas mantiveram-se acima de 60% (65,9% e 60,3%, respectivamente), valores comparáveis ao de reatores convencionais. Na terceira etapa, no entanto, houve uma queda acentuada na eficiência na remoção da DQO, de apenas 48,7%. Por este motivo, a partir do mês de janeiro de 2015, iniciaram-se as análises da DQO filtrada do efluente final. Quando comparados os valores de DQO do esgoto bruto com estas, a eficiência apresentou-se bastante elevada, de 71,8%. Na última etapa, a remoção de DQO foi de apenas 15,0%, valor extremamente baixo. Quando comparado o esgoto bruto com o efluente filtrado, a remoção foi mais elevada, de 63,9%.

É importante, no entanto, citar que a análise da eficiência do reator não pode ser feita apenas em relação à remoção de DQO. O reator UASB tende a manter uma constância nas concentrações de DQO no efluente final, mesmo que haja variabilidade na qualidade do esgoto bruto. Considerando, por exemplo, um esgoto doméstico típico,

com concentrações de DQO de literatura, o reator UASB tende a manter concentrações de saída em torno de 200 mg/L. Sob este prisma, observa-se que o reator UASB operou inadequadamente em todas as etapas, apresentando aumentos progressivos nas médias das concentrações de DQO em cada etapa, no efluente final. Desta maneira, pode-se afirmar que o reator piloto não apresentou o desempenho esperado, em termos de remoção de matéria orgânica.

Este fato pode ser observado na Figura 41, que apresenta os resultados de sólidos sedimentáveis no esgoto bruto e no efluente final, durante as Fases 1, 2 e 3:

Figura 41. Perfil de Sólidos Sedimentáveis no Esgoto Bruto e no Efluente Final do Reator UASB.

Observação: Os resultados referem-se apenas às fases 1, 2 e 3.

Percebe-se que a perda de sólidos com o efluente, embora não seja muito elevada, também não é desprezível, reforçando a justificativa apresentada anteriormente. Além disso, as análises são pontuais, embora realizadas diariamente. Portanto, picos de perda de sólidos podem não ter sido constatados. As análises de sólidos sedimentáveis foram realizadas apenas para as três primeiras etapas.

5.5. INTERVENIENTES À OPERAÇÃO DO REATOR PILOTO

Cabe ressaltar, por fim, que algumas dificuldades de ordem estrutural podem ter resultado em prejuízos ao processo, em maior ou menor escala, embora dificilmente tenham implicado em grande prejuízo aos resultados, os quais valem ser destacados:

- Falta de nivelamento das canaletas – As canaletas de coleta de efluente não estavam niveladas, resultando em caminhos preferenciais para o efluente e em velocidades mais altas na saída do efluente. Isto pode ter influenciado na perda de sólidos do sistema e, conseqüentemente, na eficiência do processo, bem como no acúmulo de espuma na superfície. Antes do início da última etapa, foi realizado um nivelamento das canaletas.
- Características do esgoto bruto – O esgoto bruto é proveniente do CRUSP. Ao longo do ano, as características do esgoto bruto variam consideravelmente, em função da população residente no campus. Naturalmente, em períodos de férias, há uma quantidade relativamente menor de pessoas, e uma vazão inferior. Além disso, a presença de um restaurante no local, de porte significativo, altera a composição do esgoto bruto ao longo do ano e ao longo do dia. Isso pode ser observado nos resultados obtidos com a coleta automática de esgoto bruto.
- Distribuição do esgoto no fundo do reator – A distribuição do esgoto no fundo do reator não ocorre de maneira homogênea, como é aconselhado. Isto resulta em possíveis caminhos preferenciais ao longo do reator, em especial na zona inferior.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados de pH, alcalinidade e ácidos orgânicos voláteis demonstram que o processo bioquímico permaneceu estável ao longo de todas as fases de operação ($16 < \text{TDH} < 8 \text{ h}$).

Em relação à remoção de matéria orgânica, os resultados remetem a um valor médio de eficiência de remoção de DQO total, para os tempos de detenção de 16, 12, 10 e 8 horas de 65,9%, 60,3%, 48,7% e 15,0%, respectivamente. Estes valores, com exceção dos dois últimos, são comparáveis aos dos reatores convencionais.

Observou-se também que, em relação à DQO do efluente final, o reator UASB operou inadequadamente em todas as etapas, apresentando aumentos progressivos nas médias das concentrações de DQO em cada etapa. As concentrações foram altas; na última etapa, a concentração média de DQO no efluente final superou 900 mg/L.

Ao que tudo indica, na última fase, houve um desequilíbrio biológico do reator, atestado pelos resultados das análises de DQO, embora não tenha sido evidenciado nos resultados de pH, alcalinidade e AOV. Desta maneira, pode-se afirmar que o reator piloto não apresentou o desempenho esperado, em termos de remoção de matéria orgânica, para TDH de 10 e 8 horas.

Em relação aos sólidos, não foi observado, de maneira geral, uma perda significativa de sólidos no efluente final, exceto em amostras pontuais. Observou-se uma redução progressiva do teor de sólidos do manto de lodo ao longo da altura do reator, decorrente de arraste de sólidos excessivo com o efluente. Na terceira fase, ocorreu uma drástica redução dos sólidos no reator, e, na Fase 4, o comportamento da manta de lodo foi pouco previsível.

Sugere-se, como estudo futuro, a implantação de um reator de lodos ativados após o reator UASB, com recirculação do lodo aeróbio para este último, ou de um decantador a jusante do UASB, de forma a recuperar parcela dos sólidos que são descarregados por este. Espera-se, com isso, obter resultados mais satisfatórios para a remoção de matéria orgânica no reator UASB.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA, AWWA, WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th ed. Washington, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10209 – Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários, 2ª Edição. Rio de Janeiro, 2011.

BIOTHANE CORPORATION. Site: www.biothane.com, 2014.

CAIXETA C. E. T.; CAMMAROTA M. C.; XAVIER A. M. F. Slaughterhouse Wastewater Treatment: Evaluation of a New Three-Phase Separation System in a UASB Reactor. Universidade de Uberlândia, Uberlândia, 2001.

CAVALCANTI, P.F.F. *Integrated Application of the UASB reactor and ponds for domestic sewage treatment in tropical conditions* Ph.D. Thesis Wageningen University, The Netherlands, 2003.

CHERNICHARO, C. A. L., et al.. *Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios*, 1ª Edição. Belo Horizonte, 2001.

CHERNICHARO, C. A. L.. *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Reatores Anaeróbios*, volume 4, 2ª Edição. Belo Horizonte, 2007.

FLORENCIO, L.; KATO, M. T.; MORAIS, J. C. *Domestic sewage treatment in Mangueira full scale UASB plant at Recife*, Pernambuco. In: VI OFICINA E SEMINÁRIO LATINOAMERICANO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA, Recife, Pernambuco - Brasil. IWA/UFPE, 2000.

GRANDIN, S. R. *Concepção das estações de tratamento de esgotos do município de Campinas-SP*. Disponível em <<http://www.semasa.sp.gov.br>>. Acesso em: dez. 2014.

HALALSHEH, M., KOPPES, J., den ELZEN, J., ZEEMAN, G., FAYYAD, M., LETTINGA, G. Effect of SRT and temperature on biological conversion and the related scum-forming potential. *Water Research*. v.39, 2005.

HASHEMIAN A. J.; JAMES A. *Gas-Liquid-Solid Separator in Anaerobic Treatment of Wastewater*. University of Newcastle, England, 1989.

IBGE. Site www.ibge.gov.br. Acesso em 10 de fevereiro de 2015.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. *Tratamento de Esgotos Domésticos*, 6ª Edição. Rio de Janeiro, 2011.

KALOGO, Y.; VERSTRAETE, W. Development of anaerobic sludge bed (ASB) reactor Technologies for domestic wastewater treatment: motives and perspectives. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, v. 15.

KASSAM, Z. A.; YERUSHALMI, L.; GUIOT, S. R. A market study on the anaerobic wastewater treatment systems. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2003.

KATO, M. T.; ANDRADE NETO, C. O.; CHERNICHARO C.A.L.; FORESTI, E.; CYBIS, L. F. Configurações de reatores anaeróbios; In: Campos (Coord.) *Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo*; Finep, CNPq & Caixa; PROSAB, ed. Rima-São Carlos-SP, 1999.

LAUBSCHER, A. C. J.; WENTZEL, M. C.; LE ROUX, J. M. W.; EKAMA, G. A. *Treatment of grain distillation wastewaters in an upflow anaerobic sludge bed (UASB) system*. *Water SA*, v. 27, n. 4, 2001.

LETTINGA, G.; HULSHOFF POL, L.W. UASB - Process design for various types of wastewaters. *Water Science Technology*, v. 24, n. 8, 1991.

LOBATO, L. C. S. *Estimativa da Produção de Biogás em Reatores UASB: Abordagem sobre Perdas*. 3º Workshop – SANEPAR/ GIZ. Curitiba, 24 de março de 2014.

MAHMOUD, N., ZEEMAN, G., GIJZENB, H., LETTINGA, G. Anaerobic stabilization and conversion of biopolymers in primary sludge—effect of temperature and sludge retention time. *Water Research*, v.38. 2004.

METCALF & EDDY, Inc. *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*, Edição 4, 2014.

Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos de 2010*. 2010.

PEÑA, M. R., MARA, D. D., AVELLA, G. P. *Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates*. *Water Research*, v.40. 2006.

PEREBOOM, J. H. F. *Size distribution model for methanogenic granule development in full scale UASB and IC reactors*. *Water Science Technology*, v.30, n. 12. 1994.

PEREIRA, J. O. *Controle da Formação de Escuma e Remoção de Matéria Orgânica em Reator UASB com Duplo Estágio de Coleta de Biogás*. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

PIVELI, R. P. *Qualidade das Águas e Poluição: Aspectos Físico-Químicos*, 1ª Edição. 2006.

PRESSINOTTI, F. C. *Estudo sobre Tratamento Anaeróbio de Esgoto*. 3º Workshop – SANEPAR/ GIZ. Curitiba, 24 de março de 2014.

PROBIOGÁS. *Guia Técnico de Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto*. 1ª Edição. Brasília, 2015.

ROSS, B. Z. L. *Escuma de Reatores Anaeróbios Tratando Esgotos Domésticos em Escala Real: Produção, Caracterização e Proposição de Parâmetros para seu Gerenciamento*. (Tese em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SANTOS, S. E. *Avaliação do desempenho operacional de um sistema reator UASB – Lagoa de polimento, Estudo de caso da ETE Juramento-MG*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas gerais, Belo Horizonte, 2003.

SANTOS, S. E.; VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. *Geração de escuma e lodo em um reator UASB em escala real tratando esgoto doméstico*. In: III SIMPÓSIO SOBRE BIOSSÓLIDOS DO MERCOSUL, I SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE BIOSSÓLIDOS, São Paulo. [Anais Eletrônico] 2003.

SATO, N.; OKUBO, T.; ONODERA, T.; OHASHI, A.; HARADA, H. *Prospects for a selfsustainable sewage treatment system: A case study on full-scale UASB system in India's Yamuna River Basin*. Journal of Enviornmental Management, v. Article in press, 2005.

SEGHEZZO L., ZEEMAN G., VAN LIER J.B., HAMELERS H.V.M., LETTINGA G. The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. *Reviews in: Bioresource Technology*, v. 65. 1998.

SNIS. www.snis.gov.br. Acesso em 08 de agosto de 2014.

SOUZA, C. L. Estudo quantitativo e qualitativo de espuma acumulada em reatores UASB tratando esgotos domésticos. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

SOUZA, C.L., SILVA, S.Q., AQUINO S.F., CHERNICHARO C.A.L. Production and characterization of scum and its role in odour control in UASB reactors treating domestic wastewater, *Water Science Technology*, v. 54, n. 9. 2006.

VAN HAANDEL, A.; LETTINGA, G. *Tratamento anaeróbio de esgoto. Um manual para regiões de clima quente*.ed. Campina Grande, Brasil: Universidade Federal da Paraíba. 1994.

VERSIANI, B. M. *Desempenho de um reator UASB submetido a diferentes condições operacionais tratando esgotos sanitários do Campus da UFRJ*. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte. 2005.