

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-graduação em Saneamento,
Meio Ambiente e Recursos Hídricos

ESTUDO QUANTITATIVO E QUALITATIVO DE ESCUMA
ACUMULADA EM REATORES UASB TRATANDO
ESGOTOS DOMÉSTICOS

Cláudio Leite de Souza

Belo Horizonte
2006

Cláudio Leite de Souza

Estudo quantitativo e qualitativo de espuma acumulada em reatores UASB tratando esgotos domésticos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Saneamento

Linha de pesquisa: Digestão anaeróbia e técnicas de tratamento e pós-tratamento de esgotos.

Orientador: Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

Co-orientador: Sérgio Francisco de Aquino

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
Outubro – 2006

*Ao meu pai (Carlinhos),
minha mãe (Fatinha),
minha avó (Nair) e a
Suzy*

AGRADECIMENTOS

O meu profundo agradecimento vai para os seguintes nomes e tantos outros que contribuíram direta ou indiretamente para a colocação de tijolo sobre tijolo nessa construção que foi longa, árdua, mas valiosa:

Ao grande Cosmos e sua inteligência evidente, pela obra evolutiva que possibilitou que a humanidade surgisse na Terra com seus problemas e suas virtudes;

A Jesus Cristo, o mestre dos mestres, que serviu de exemplo e continuará servindo para aqueles que têm olhos de ver e ouvidos de escutar;

Ao meu pai, Carlos Antonio de Souza, pela força e pelo amor velado e constante;

A minha mãe, Aparecida de Fátima Leite de Souza, pelas orações e pelo amor de mãe e eterno;

Aos meus irmãos, Roberta e Rodrigo, pela proximidade dos corações, apesar da distância;

A minha querida Suzana, pelo sorriso largo e pela alegria estampada no rosto, pelo amor, dedicação e auxílio em tantos momentos. Grande amor em minha vida;

A todos da minha grande família, concentrados na minha querida Ubá, pela união especialmente nos períodos difíceis;

Aos amigos de república, Marcos Caproni, Luciando e Alessandro, pela descontração, risos e amizade;

Aos amigos do mestrado, Carol Ventura, Maristela, Carol Bahia, Vívian, Wesley, Josiane, Estephania, pelo compartilhamento de emoções diversas;

Aos amigos da equipe PROSAB inicial, Deneb, Carlota, Vanessa, Reginaldo, Valéria, Adriana, pela boa recepção e auxílio nos primeiros passos;

Aos amigos da equipe PROSAB atual, Fernando, Ana Raquel, Cristina, André, Sabrina, Wilson, Betânia, Tatiana, Luciana, Isabela, pelos momentos partilhados;

Aos outros amigos, Paulo, Jackson, Silvia, Carolzinha, pela amizade em várias circunstâncias;

Ao professor Carlos A. L. Chernicharo, pelas orientações sempre precisas e determinantes, pela oportunidade de pesquisar no PROSAB e de continuar pesquisando depois da experiência na COPASA;

Ao amigo Sérgio Aquino, pela co-orientação e pelo grande exemplo de pesquisador;

À Silvana, por ser uma mãe para a Escuma e por todo o auxílio em várias situações;

Aos funcionários da escola, Wagner (porteiro), Sr. Raimundo (construtor e operador da ETE), Norma (laboratorista), Dona Chica (“faz-tudo” com amor), Luciner (motorista), Iara (secretária da Pós), Cláudia (secretária do DESA), por seus trabalhos prestados com muito carinho.

“Qualquer caminho é apenas um caminho e não constitui insulto algum – para si mesmo ou para os outros – abandoná-lo quando assim ordena seu coração. Olhe cada caminho com cuidado e atenção. Tente-o quantas vezes julgares necessário... Então faça a si mesmo e apenas a si mesmo uma pergunta: Possui este caminho um coração? Em caso afirmativo, o caminho é bom. Caso contrário, esse caminho não possui importância alguma.”

Carlos Castañeda

“A coisa mais bela que o homem pode experimentar é o mistério. É esta a emoção fundamental que está na raiz de toda a ciência e arte. O homem que desconhece este encanto, incapaz de sentir admiração e estupefação, esse já está por assim dizer, morto. E tem os olhos extintos.”

Albert Einstein

“Chegará o dia em que, depois de utilizar os espaços, os ventos, as marés e a gravidade, o homem vai implorar a Deus para utilizar a energia do amor. E, nesse dia, pela segunda vez na história do mundo, teremos descoberto o fogo.”

Teilhard de Chardin

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho foi o de caracterizar a espuma acumulada em reatores UASB em escala de demonstração tratando esgotos tipicamente domésticos. Para isso, dois reatores UASB idênticos foram implantados, sendo um alimentado com esgoto doméstico bruto (R1) e outro com o mesmo esgoto submetido a uma etapa prévia de peneiramento forçado (R2). Os reatores foram operados com tempos de detenção hidráulica variados (9,0, 7,0, 5,0 e 9,0 h), configurando quatro fases operacionais. A acumulação de espuma foi medida periodicamente e sua caracterização envolveu análises de DBO, DQO, ST, STV, de matéria orgânica específica e fração biodegradada. Para um terceiro reator (R3) a camada de espuma foi monitorada durante um tempo prolongado, para uma única fase operacional e sem retiradas periódicas de toda a camada. Os resultados obtidos indicam, em geral, que houve semelhanças nas acumulações, características físico-químicas e de fração biodegradada para espuma acumulada no decantador dos dois reatores UASB R1 e R2 em uma mesma fase. No entanto, a partir das mudanças da primeira até a terceira fase experimental houve aumentos na acumulação, na concentração de ST e DQO e diminuições na relação STV/ST para essa espuma, o que deve ter sido provocado por diminuições no TDH nos reatores e aumento na velocidade ascensional. A acumulação da espuma no decantador do reator R3 demonstrou se influenciar por fatores externos. O descarte do lodo de excesso do reator teria diminuído a progressão da acumulação, e a chuva muito forte teria reduzido o volume presente na camada. A espuma acumulada no separador trifásico dos reatores UASB apresentou-se bem mais diluída do que a do decantador, acumulando numa taxa menor e também apresentando uma menor relação STV/ST. Na espuma do decantador, análises microscópicas revelaram a presença de vários tipos morfológicos de bactérias, incluindo bacilos longos e bacilos curvos, ambos com grânulos intracelulares, e bacilos formando aglomerados celulares. Filamentos de cianobactérias e outros microrganismos fotossintetizantes foram também observados, contudo com muito mais frequência para o reator R3.

ABSTRACT

The aim of this work was to characterize the scum accumulated in three demonstration scale UASB reactors fed on domestic wastewater. Two identical reactors (R1 and R2) were operated under different hydraulic retention times (HRT) - 9.0, 7.0, 5.0 and 9.0 hours -, representing four distinct operational phases. The only difference between the reactors R1 and R2 is that the latter was preceded by a forced screening unit. Differently from R1 and R2, the scum layer of R3 was monitored under the same operational condition for a long time and did not involve the complete scum removal in the settling tank. Scum accumulation in all reactors was periodically assessed in each operational phase, and its characterization involved analyses of BOD, COD, solids, as well as microscopic observations and biodegradability tests. The results obtained for R1 and R2 reactors showed that the accumulation of scum, BOD, COD, solids and biodegradability measured, in general, were similar in both reactors. However, from the first to the third operational phase, although the relation VTS/TS decreased, the scum accumulation, solids and COD values increased. The differences between the early stages of phase 1 and the end of phase 3 may be caused by the decrease in the HRT and the increase in the upflow velocity. For the R3 reactor, it was observed low scum accumulation and this was probably due to the external factors such as excess sludge discharge and heavy rainfall. The biodegradability tests showed that the scum accumulated in the settling tank of all reactors were better degraded under anaerobic than aerobic conditions, especially for the long time incubation experiment. The scum accumulated in the three-phase separator was different from that formed in the settling tanks, being accumulated in lower rates and with lower relation VTS/TS ratios. Microscopic analysis showed the presence of several bacterial morphotypes including filaments and rods with internal sulfur granules in the scum from the settling tank. Cyanobacteria-like cells and eukaryotic photosynthetic organisms were also observed, however they appeared to be more frequent in the R3 reactor.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 3 |
| 2.1 | OBJETIVO GERAL..... | 3 |
| 2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 3 |
| 3 | REVISÃO DA LITERATURA..... | 4 |
| 3.1 | INTRODUÇÃO..... | 4 |
| 3.2 | DEFINIÇÃO DE ESCUMA..... | 4 |
| 3.2.1 | <i>O que é espuma?</i> | 4 |
| 3.2.2 | <i>Termos produção e acumulação</i> | 5 |
| 3.2.3 | <i>Escuma x Espuma</i> | 6 |
| 3.2.3.1 | Generalidades..... | 6 |
| 3.2.3.2 | Definição de espumação..... | 7 |
| 3.2.4 | <i>Produção de espuma</i> | 8 |
| 3.2.5 | <i>Acumulação de espuma</i> | 9 |
| 3.3 | ESCUMA EM DIGESTORES ANAERÓBIOS..... | 9 |
| 3.3.1 | <i>Reatores anaeróbios tratando lodos de sistemas de lodos ativados</i> | 9 |
| 3.3.2 | <i>Reatores tratando resíduos líquidos em geral</i> | 12 |
| 3.4 | ESCUMA EM REATORES UASB..... | 14 |
| 3.4.1 | <i>Aspectos gerais</i> | 14 |
| 3.4.2 | <i>Princípios do funcionamento de reatores UASB</i> | 16 |
| 3.4.3 | <i>Escuma do decantador versus escuma do separador</i> | 18 |
| 3.4.4 | <i>Inconvenientes da escuma em reatores UASB</i> | 21 |
| 3.4.5 | <i>Fatores potencialmente intervenientes na produção, acumulação e na constituição da escuma de reatores UASB</i> | 23 |
| 3.4.5.1 | Concentração do afluente..... | 23 |
| 3.4.5.2 | Constituição específica da matéria orgânica afluente..... | 24 |
| 3.4.5.3 | Projeto do reator..... | 25 |
| 3.4.5.4 | Parâmetros de operação do reator..... | 27 |
| 3.4.6 | <i>Coefficientes de acumulação e caracterização físico-química de escuma de reatores UASB</i> | 29 |
| 3.4.7 | <i>Aspectos microbiológicos de escuma em reatores UASB</i> | 31 |
| 3.5 | ASPECTOS DA BIODEGRADAÇÃO DE MATERIAIS COMPLEXOS..... | 32 |
| 4 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 35 |
| 4.1 | INTRODUÇÃO..... | 35 |
| 4.2 | APARATO EXPERIMENTAL E FASES OPERACIONAIS..... | 35 |
| 4.3 | AValiação da acumulação da escuma nos reatores UASB..... | 37 |
| 4.3.1 | <i>Medição da escuma acumulada no decantador dos reatores R1 e R2</i> | 37 |
| 4.3.2 | <i>Medição da escuma acumulada no interior do separador trifásico dos reatores R1 e R2</i> | 38 |
| 4.3.3 | <i>Acompanhamento da evolução da acumulação da escuma no decantador do reator UASB R3 em tempo prolongado</i> | 39 |
| 4.4 | AValiação de parâmetros qualitativos da escuma nos reatores UASB..... | 41 |
| 4.4.1 | <i>Amostragem e preparo das amostras para procedimentos analíticos</i> | 41 |
| 4.4.2 | <i>Procedimentos analíticos físico-químicos</i> | 42 |
| 4.4.3 | <i>Testes de fração biodegradada da escuma</i> | 44 |
| 4.4.3.1 | Testes de fração biodegradada aerobiamente..... | 44 |
| 4.4.3.2 | Testes de fração biodegradada anaerobiamente..... | 45 |
| 4.5 | CARACTERIZAÇÃO CROMATOGRÁFICA DA ESCUMA..... | 48 |
| 4.5.1 | <i>Introdução</i> | 48 |
| 4.5.2 | <i>Preparo da amostra</i> | 49 |
| 4.5.3 | <i>Método cromatográfico</i> | 49 |
| 4.6 | CARACTERIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA DA ESCUMA..... | 50 |
| 4.7 | ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DOS AFLUENTES E EFLUENTES AOS REATORES UASB..... | 50 |
| 4.8 | CÁLCULO DA INFLUÊNCIA DA CAMADA DE ESCUMA NA QUALIDADE DO EFLUENTE..... | 51 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 52 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.1 | CARACTERÍSTICAS DO ESGOTO DE ALIMENTAÇÃO | 52 |
| 5.2 | CARACTERIZAÇÃO VISUAL DA ESCUMA ACUMULADA NOS REATORES UASB | 53 |
| 5.3 | CARACTERIZAÇÃO QUANTITATIVA DA ESCUMA ACUMULADA NOS REATORES UASB | 56 |
| 5.3.1 | <i>Acumulação da espuma no decantador dos reatores UASB R1 e R2</i> | 56 |
| 5.3.1.1 | Acumulação em cada fase e reator | 56 |
| 5.3.1.2 | Evolução da acumulação ao longo de cada fase | 63 |
| 5.3.2 | <i>Acumulação de espuma no decantador do reator R3 em tempo prolongado</i> | 66 |
| 5.3.3 | <i>Acumulação de espuma no interior do separador trifásico dos reatores UASB R1 e R2</i> | 68 |
| 5.4 | CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA ESCUMA ACUMULADA NOS REATORES UASB | 71 |
| 5.4.1 | <i>Caracterização físico-química da espuma acumulada no decantador dos reatores R1 e R2</i> | 71 |
| 5.4.2 | <i>Caracterização físico-química da espuma acumulada no decantador do reator R3 ao longo de tempo prolongado</i> | 77 |
| 5.4.3 | <i>Caracterização físico-química da espuma acumulada no separador trifásico dos reatores UASB R1 e R2</i> | 78 |
| 5.4.4 | <i>Interferência dos sólidos da espuma do decantador com a qualidade do efluente final</i> | 79 |
| 5.4.4.1 | Previsão da influência da espuma dos reatores R1, R2 e R3 se não houvesse retenção | 79 |
| 5.4.4.2 | Influência da espuma do reator R3 mesmo com retenção | 81 |
| 5.5 | FRAÇÃO BIODEGRADADA DA ESCUMA ACUMULADA NOS REATORES UASB | 83 |
| 5.5.1 | <i>Fração biodegradada aerobicamente para espuma do decantador dos reatores UASB R1 e R2</i> | 83 |
| 5.5.2 | <i>Fração biodegradada anaerobicamente para espuma do decantador dos reatores UASB R1 e R2</i> | 84 |
| 5.5.2.1 | Os testes iniciais | 84 |
| 5.5.2.2 | Os testes padronizados | 85 |
| 5.5.3 | <i>Fração biodegradada para espuma do decantador do reator UASB R3 ao longo de tempo prolongado</i> | 87 |
| 5.6 | CARACTERIZAÇÃO CROMATOGRÁFICA DA ESCUMA ACUMULADA NOS REATORES UASB | 88 |
| 5.6.1 | <i>Caracterização cromatográfica da espuma do decantador dos reatores R1 e R2</i> | 88 |
| 5.7 | CARACTERIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA DA ESCUMA ACUMULADA NOS DECANTADORES DOS REATORES UASB | 92 |
| 5.7.1 | <i>Caracterização microbiológica da espuma de superfície esverdeada</i> | 92 |
| 5.7.2 | <i>Caracterização microbiológica da espuma acinzentada</i> | 94 |
| 6 | CONCLUSÕES | 96 |
| 7 | RECOMENDAÇÕES | 101 |
| 8 | REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS | 102 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 3.1 – Esquema de digestor anaeróbio ovalado e sua região superior para controle da camada de espuma | 11 |
| Figura 3.2 – Corte esquemático de um reator UASB convencional | 18 |
| Figura 3.3 – Corte esquemático de um reator UASB com a vista da espuma no decantador e interior do separador..... | 19 |
| Figura 4.1 – Vista dos reatores UASB R1 e R2 antes da fase 1 | 37 |
| Figura 4.2 – Vista do reator UASB R3 existente na ETE experimental | 37 |
| Figura 4.3 – Vista da peneira componente da unidade de peneiramento | 37 |
| Figura 4.4 – Corte esquemático dos reatores UASB geminados R1 e R2 e visualização das escumas acumuladas..... | 38 |
| Figura 4.5 – Esquema de medição da espuma acumulada no decantador do reator R3, sem retirada total..... | 40 |
| Figura 4.6 – Foto do moinho de bolas e acessórios usados no preparo das amostras | 42 |
| Figura 4.7 – Foto de um recipiente contendo uma amostra de espuma resultante do preparo | 42 |
| Figura 4.8 – Fluxograma dos procedimentos de amostragem e preparo das amostras de espuma para análise..... | 43 |
| Figura 4.9 – Fluxograma das análises de caracterização qualitativas (físico-química e biodegradação) feitas sobre as amostras de escumas..... | 44 |
| Figura 4.10 – Frascos de antibiótico de 110 ml incubados a 30°C e com rotação orbital de 210 rpm..... | 47 |
| Figura 4.11 – Incubadora shaker usada nos testes de fração biodegradada anaerobiamente | 47 |
| Figura 5.1 – Vista da camada de espuma acumulada durante a fase 1 (decantador do R1)..... | 55 |
| Figura 5.2 – Vista da camada de espuma acumulada durante a fase 2 (decantador do R1)..... | 55 |
| Figura 5.3 – Vista da camada de espuma acumulada durante a fase 3 (decantador do R2)..... | 55 |
| Figura 5.4 – Vista da camada de espuma acumulada durante a fase 4 (decantador do R1)..... | 55 |
| Figura 5.5 – Vista da camada de espuma acumulada no decantador do reator R3..... | 55 |
| Figura 5.6 – Coeficientes de acumulação de espuma do decantador nas fases 1 e 2..... | 56 |
| Figura 5.7 – Coeficientes de acumulação de espuma do decantador nas fases 3 e 4..... | 56 |
| Figura 5.8 – Box-Whiskers do coeficiente de acumulação (gST/kgDQO _{apl.}) de espuma no decantador em todas fases..... | 60 |
| Figura 5.9 – Box-Whiskers do coeficiente de acumulação (l/kgSST _{apl.}) de espuma no decantador em todas fases..... | 60 |
| Figura 5.10 – Evolução temporal e ajuste para o coeficiente de acumulação de espuma do decantador na Fase 1 | 63 |
| Figura 5.11 – Evolução temporal e ajuste para o coeficiente de acumulação de espuma do decantador na Fase 2 | 64 |
| Figura 5.12 – Evolução temporal e ajuste para o coeficiente de acumulação de espuma do decantador na Fase 3..... | 64 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.13 – Evolução temporal para os coeficientes de acúmulo em termos de litros de espuma, no reator R3 | 66 |
| Figura 5.14 – Evolução temporal para os coeficientes de acúmulo em termos de gST de espuma, no reator R3 | 67 |
| Figura 5.15 – Box-Whiskers dos ST da espuma do decantador para os reatores R1 e R2 em todas as fases..... | 73 |
| Figura 5.16 – Box-Whiskers da DQO da espuma do decantador para os reatores R1 e R2 em todas as fases..... | 74 |
| Figura 5.17 – Box-Whiskers da DBO da espuma do decantador para os reatores R1 e R2 em todas as fases..... | 75 |
| Figura 5.18 – Box-Whiskers dos STV/ST da espuma do decantador para os reatores R1 e R2 em todas as fases | 75 |
| Figura 5.19 – Evolução temporal das características físico-químicas da espuma do decantador do reator R3..... | 78 |
| Figura 5.20 – Evolução temporal e ajuste da DQO particulada efluente ao reator R3..... | 82 |
| Figura 5.21 – Evolução temporal e ajuste dos SST efluentes ao reator R3..... | 82 |
| Figura 5.22 – Fração biodegradada aerobiamente da espuma do decantador dos reatores R1 e R2 em todas as fases operacionais | 83 |
| Figura 5.23 – Fração biodegradada anaerobiamente da espuma do decantador dos reatores R1 e R2..... | 86 |
| Figura 5.24 – Evolução temporal das frações biodegradadas aerobia e anaerobiamente da espuma do decantador do reator R3 | 87 |
| Figura 5.25 – Cromatogramas do afluente, efluente e espuma do decantador do reator R1. Extração com Acetato de Etila em pH = 7, coleta feita em 02/09/05..... | 90 |
| Figura 5.26 – Cromatogramas do afluente, efluente e espuma do decantador do reator R2. Extração com Acetato de Etila em pH = 7, coleta feita em 02/09/05..... | 90 |
| Figura 5.27 – Cromatogramas do afluente, efluente e espuma do decantador do reator R1. Extração com Acetato de Etila em pH = 7, coleta feita em 21/10/05..... | 91 |
| Figura 5.28 – Cromatogramas do afluente, efluente e espuma do decantador do reator R2. Extração com Acetato de Etila em pH = 7, coleta feita em 21/10/05..... | 91 |
| Figura 5.29 – Microscopia de campo claro da espuma esverdeada. (a) filamentos de cianobactérias, aumento 400x. (b) microrganismos flagelados similares aos gêneros <i>Chlamydomonas</i> (célula menor) e <i>Euglena</i> (célula maior), aumento de 1000x. (c) diatomáceas com cloroplasto marrom, aumento 1000x. | 93 |
| Figura 5.30 – Microscopia de contraste de fase da espuma esverdeada. (a) filamentos de <i>Beggiatoa</i> com grânulos refringentes e cianobactérias. (b) bacilos grandes com grânulos internos. (c) aglomerado de bacilos. Aumento de 1000x..... | 94 |
| Figura 5.31 – Microscopia de contraste de fase da espuma acinzentada. (a) (b) bacilos e filamentos com grânulos internos. (c) bacilos aglomerados. Aumento de 1000x..... | 95 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 – Valores de coeficientes de acumulação de espuma para diversos estudos | 30 |
| Tabela 3.2 – Valores de características físico-químicas de espuma de reatores UASB | 30 |
| Tabela 4.1 – Condições de operação dos reatores UASB estudados (fases operacionais). | 36 |
| Tabela 4.2 – Concentrações dos nutrientes componentes da solução de diluição usada nos testes de fração biodegradada anaerobiamente | 46 |
| Tabela 5.1 – Características físico-químicas do esgoto afluyente aos reatores UASB | 52 |
| Tabela 5.2 – Coeficientes de acumulação de espuma em todas as fase operacionais para os decantadores dos reatores R1 e R2 | 58 |
| Tabela 5.3 – Resultados dos coeficientes de acumulação de espuma no interior do separador trifásico dos reatores R1 e R2 | 68 |
| Tabela 5.4 – Resultados das características físico-químicas da espuma do decantador em todas as fases..... | 71 |
| Tabela 5.5 – Resultados de matéria orgânica específica da espuma do decantador dos reatores R1 e R2 | 77 |
| Tabela 5.6 – Características físico-químicas da espuma do interior do separador trifásico . | 79 |
| Tabela 5.7 – Resultados da hipotética influência dos sólidos da espuma sobre a qualidade do efluente | 80 |

LISTA DE ABREVIATURAS

AGCL: Ácidos Graxos de Cadeia Longa

AGV: Ácidos Graxos Voláteis

AIDT: Área de Influência dos Tubos Distribuidores

BMP: Biochemical Methane Potential

COPASA: Companhia de Saneamento de Minas Gerais

DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio

DESA: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental

DQO: Demanda Química de Oxigênio

DQO_{apl.}: Demanda Química de Oxigênio aplicada

EGSB: Expanded Granular Sludge Bed

ETE: Estação de Tratamento de Esgotos

PFE: Potencial de Formação de Escuma

pH: potencial Hidrogeniônico

PROSAB: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico

Q: vazão (l/s)

R²: coeficiente de determinação

Rpm: Rotação por minuto

SANASA: Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A

SMARH: Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

SS: Sólidos Suspensos

SST_{apl.}: Sólidos Suspensos Totais aplicados

SST: Sólidos Suspensos Totais

ST: Sólidos Totais

STV: Sólidos Totais voláteis

TDH: Tempo de Detenção Hidráulica

TRS: Tempo de Retenção de Sólidos

UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket

UFMG: Universidade Federal de Minas Gerais

V_{asc.}: Velocidade ascensional

1 INTRODUÇÃO

Com o relativo aumento da consciência ambiental, seja por meio de um despertar para a importância da sustentabilidade da vida no planeta, seja simplesmente por força de lei, tem-se aumentado o número de Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) domésticos implantadas no Brasil. No caso particular brasileiro, uma tecnologia que muito se adaptou às condições de clima (tropical), às condições financeiras (reduzido volume de investimentos) e mesmo às necessidades ambientais imediatas (premência de remoção da elevada carga orgânica afluyente aos rios), foi a tecnologia anaeróbia, em particular aquela que emprega reatores de manta de lodo ou UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket).

Os reatores UASB congregam duas características fundamentais ao tratamento biológico, quais sejam, elevados tempos de retenção da biomassa e baixos tempos de detenção hidráulica. Tais propriedades são conseguidas graças ao fluxo hidráulico ascendente e a elementos internos que fazem uma separação eficiente das três fases existentes no interior do reator (sólida, líquida e gasosa). O elemento chave neste processo é o denominado, sugestivamente, separador trifásico, o qual se localiza na parte mais superior do reator e o divide em duas zonas de separação, uma sólido/líquido (zona de decantação) e outra líquido/gás (interior do separador). O efluente final sai a partir de uma dada altura na zona de decantação e o gás sai através da interface líquida/gasosa no interior do separador.

Como em todo reator de tratamento, os do tipo UASB geram subprodutos que necessitam também de um gerenciamento adequado. O lodo é um dos seus subprodutos sólidos, sobre o qual já se dispõe de um relativo conhecimento acumulado a respeito de manejo. Contudo, tais reatores revelam também a geração de espuma – camada de materiais flutuantes – a qual pode ocorrer em dois compartimentos distintos, a saber, no compartimento de decantação (na superfície normalmente em contato com a atmosfera) e no interior do separador trifásico (na interface de liberação dos gases formados durante a digestão).

Os inconvenientes da espuma acumulada nos reatores UASB tratando esgotos domésticos não estão totalmente desvendados. Porém, se uma acumulação de espuma ocorrer no interior do separador trifásico, o caminho natural do biogás para a parte superior poderá ser comprometido, ocasionando eventual escape de biogás para a zona de decantação, isto sendo danoso à sedimentação do lodo. Além disso, o acúmulo de espuma na unidade de decantação

pode prejudicar a qualidade do efluente final se esse material flutuante, em grande quantidade, escapar com o efluente.

Por fim, pode-se dizer que pouco se avançou no conhecimento sobre valores de taxas de acumulação de espuma em reatores UASB tratando esgotos domésticos e mesmo sobre características físico-químicas e de biodegradação da espuma. Nos projetos atuais de reatores biológicos em escala plena, são recorrentes as incertezas quanto à previsão das quantidades de espuma acumulada, bem como sobre as melhores alternativas para sua remoção, tratamento e disposição final. Portanto, o meio técnico científico prescinde de estudos mais detidos sobre esse subproduto do tratamento de esgotos, a fim de se avaliarem limitações do tratamento anaeróbio.

Dessa forma, o presente estudo se colocou pretendendo contribuir nessas lacunas de conhecimento sobre a espuma acumulada em reatores UASB. Assim sendo, caracterizações de natureza quantitativa e qualitativa da camada de espuma constituída foram realizadas em diferentes reatores e contextos operacionais. Utilizaram-se três reatores UASB em escala demonstração (R1, R2, R3), tratando esgotos domésticos produzidos na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Determinar a constituição físico-química da espuma acumulada em reatores tipo UASB tratando esgotos domésticos, suas características de biodegradação e seus coeficientes de acumulação, em diferentes condições operacionais dos reatores.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar as diferenças nos coeficientes de acumulação e nas características físico-químicas da espuma entre as unidades de decantação e interior do separador trifásico dos reatores UASB;
- Avaliar se uma unidade de peneiramento forçado precedente ao reator UASB afeta os coeficientes de acumulação de espuma e suas características físico-químicas e de biodegradação;
- Avaliar se diferentes parâmetros operacionais aplicados aos reatores UASB influenciam os coeficientes de acumulação de espuma bem como suas características físico-químicas e de biodegradação;
- Avaliar a evolução temporal das características da espuma acumulada no decantador de um reator UASB quando a mesma não é retirada totalmente em procedimentos de limpeza periódicos;
- Determinar características cromatográficas da espuma, e compará-las com a caracterização cromatográfica do afluente e efluente;
- Determinar características microbiológicas das espumas dos reatores UASB em diferentes condições operacionais.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Introdução

Uma busca pelo atual estado do conhecimento sobre o problema de espuma em reatores UASB inicialmente apontou para o estabelecimento de uma definição de espuma, de forma a poder diferenciar a sua ocorrência com a de outros subprodutos do tratamento de esgotos. Posteriormente, o direcionamento foi dado para o fenômeno de espuma em digestores anaeróbios, os quais são reatores de tratamento usados há muito mais tempo que os reatores UASB. Atingiu-se o ponto essencial desta revisão de bibliografia com as ocorrências de espuma nos atuais reatores UASB, suas possíveis inconveniências e os fatores que influenciam na formação, acumulação e na constituição do material. Na seqüência, um incipiente entendimento sobre a microbiologia da espuma nesses reatores contribuiu para discussões a respeito de aspectos positivos ou negativos dessa camada no processo de tratamento. Por fim, com o propósito de se cogitar algum tratamento biológico para a espuma, entendendo-a como um material complexo, uma curta revisão bibliográfica sobre biodegradação de materiais desse tipo fez-se necessária.

3.2 Definição de espuma

3.2.1 O que é espuma?

As definições para a espuma em processos de tratamento de águas residuárias, de uma maneira geral, concordam que se trata de uma camada de materiais que flutuam superficialmente nos reatores. Segundo Chernicharo (1997) uma grossa camada de espuma pode ser constituída por compostos de difícil degradação, as gorduras, além de outras matérias flutuantes. Complementando, Moen (2003) relata que os óleos e graxas contidos no afluente aos reatores, sendo insolúveis e menos densos que a matriz sólido/água, em situação de mistura inadequada, se acumulam na camada superficial. Assim, essas referências motivam a idéia inicial de que espuma seja essencialmente uma camada de óleos, graxas e gorduras provindos do afluente que por serem de difícil degradação, pouco densos e insolúveis em água, se acumulam numa camada de topo ao volume em tratamento.

Talvez uma das definições mais extensas, mas nem por isso a mais completa, é, resumidamente, a de que a espuma pode conter gordura, óleos, ceras, sabões, restos de comida, cascas de frutas e vegetais, cabelos, papel e algodão, pontas de cigarros, materiais

plásticos, partículas de areia e materiais similares, apresentando massa específica menor que 1,0 e usualmente perto de 0,95 (METCALF e EDDY, 1991).

Raman *et al.* (1989), citando FRY (1975), definem espuma como uma mistura de cabelos de animais, partículas de pele, palhas de leitões de animais, penas, fibras e qualquer coisa que flutue, conceito esse influenciado por sua experiência específica com digestores de dejetos de animais. Laubscher *et al.* (2001), em seu estudo com reatores UASB tratando efluentes da destilação de cereais, caracterizaram a camada de espuma 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. Portanto, a constituição da espuma parece depender fundamentalmente do tipo de água residuária a ser tratada e do tipo de reator de tratamento.

Por sua vez, unindo-se as informações de Cook e Boening (1987) e Gerard (2003), entende-se a espuma como uma camada de materiais como graxas, gorduras, matérias vegetais, plásticos, cabelos, produtos de borracha e células microbiológicas mortas, isto é, produtos com massa específica menor que 1, levados para a superfície do reator impulsionados por bolhas de gás. Essa conceituação, mais genérica, abrangente e que, a um só tempo, caracteriza a espuma e fornece motivadores causais para sua formação, parece ser a que melhor auxilie na definição geral do fenômeno ora estudado.

Portanto, espuma, no contexto de reatores de tratamento de águas residuárias, é um subproduto de processo que se acumula na superfície dos tanques em geral. Potencialmente se constitui de materiais diversos, sendo, conseqüentemente, bastante heterogênea.

3.2.2 Termos produção e acumulação

Antes de prosseguir com o presente estudo, para o qual é importante entender a quantidade de espuma que se estabelece na superfície de reator de tratamento de esgotos, é relevante tecer considerações sobre definições de três termos fundamentais, quais sejam, produção, formação e acumulação. Na verdade, entende-se que formação e produção são a mesma coisa, ou seja, a espuma é formada ou produzida pelo processo de tratamento quando ela surge em superfície independentemente do tempo de duração mantendo a integridade de espuma. Diferentemente, acumulação é um conceito dependente do tempo considerado na mensuração.

Assim sendo, uma camada de espuma se acumula, em um dado tempo de referência, na medida em que a sua formação ou produção seja maior do que seu consumo ou decomposição. A definição de acumulação de espuma será, então, a diferença entre a formação (ou produção) e a decomposição (ou consumo).

3.2.3 Escuma x Espuma

3.2.3.1 Generalidades

Recorrendo-se ao conceito vernáculo, é encontrado que espuma é sinônimo para escuma. Seja pela questão lingüística, ou mesmo em virtude da semelhante característica de ser flutuante, ou menos densa do que a água, os termos escuma e espuma são freqüentemente usados indistintamente. De fato, há relações, mas também diferenciações entre escuma e espuma que precisam ser desanuviadas para que os dois fenômenos tenham gestões adequadas. De particular interesse para este estudo é a gestão de escuma em reatores de tratamento de esgotos.

De acordo com Moen (2003) e Gerard (2003), muito embora ambas, escuma e espuma, se constituam em possíveis problemas para a operação de reatores anaeróbios, a incidência e solução desses distintos problemas são também diferenciadas. Moen (2003) afirma que aos compostos de óleos e graxas, os quais segundo ele próprio são precursores da escuma, podem aderir bolhas de gás causando a formação de uma camada densa de espuma. Por outro lado, Gerard (2003) relata que a escuma pode conter bolhas de gás aderidas.

Para Cook e Boening (1987), uma diferenciação entre espuma e escuma é que a primeira sempre tem bolhas de gás aderidas, porém a escuma pode não ter gases associados com sua formação. Em adição, os mesmos autores comentam que escuma e espuma, ambas, têm elevada concentração de microrganismos filamentosos.

Nesse sentido, óleos e graxas, bolhas de gás e microrganismos não parecem ser elementos distintivos para as ocorrências de escuma e espuma. Assim sendo, a elucidação da diferença entre escuma e espuma deve passar, inicialmente, por uma compreensão dos fenômenos envolvidos na formação e acumulação de cada uma.

3.2.3.2 Definição de espumação

São considerados pré-requisitos para formação de espuma em reatores: presença de bolhas de gás e material hidrofóbico combinados com substâncias surfactantes, isto é, aquelas que têm a propriedade de diminuir a tensão superficial da água (FOOT e ROBINSON, 2003, BARBER 2005). Foot e Robinson (2003) alertam para a diferença entre espumação biológica, cujos elementos chaves estão colocados acima neste parágrafo, e espumação química, a qual seria causada por excesso de surfactantes e bolhas de gases, sem o elemento hidrofóbico estabilizador. Neste aspecto, em continuidade, Foot e Robinson (2003) afirmam que a espuma química tem tipicamente uma meia-vida bem curta quando comparada com a da espuma biológica e, em concordância com Barber (2005), que os filamentos microbianos são os hidrofóbicos responsáveis pela estabilidade desta espuma.

Depreende-se, portanto, que a espuma, biológica e estável, forma-se quando há o encontro de bolhas de gás e células hidrofóbicas na superfície de um líquido com tensão superficial diminuída pela ação de surfactantes ou biosurfactantes, os quais são surfactantes produzidos pelos microrganismos. Barber (2005) ainda comenta que gorduras, óleos, graxas e outros materiais particulados podem agir estabilizando a espuma.

São eventos que causam as ocorrências evidenciadas de espuma em digestores anaeróbios: instabilidade metabólica em situações de partida do reator ou mesmo em condições de má mistura, aumento da alcalinidade dentro do digestor, fatores que intensificam o efeito surfactante; lodo de alimentação do digestor com elevada proporção de bactérias filamentosas, promovendo acúmulo de hidrofóbicos; mistura do digestor com recirculação de gás em lugar da mistura mecânica, gerando acréscimo das bolhas de gás (PAGILLA *et al.*, 1997; GERARD, 2003; MOEN, 2003).

Alguns problemas relacionados com acumulação de espuma em reatores anaeróbios, isto é, espumas biológicas em digestores de lodo, incluem perda de capacidade volumétrica, entupimento das tubulações de coleta de gás devido à aderência de sólidos da espuma, perda de geração de energia elétrica a partir de menos biogás conseguido, extravasamento de espuma no reator gerando maus odores, bloqueio de dispositivos de mistura a gás, inversão do perfil de sólidos, cobrimento de bomba de recirculação de lodo, entre outros (PAGILLA *et al.*, 1997; BARBER, 2005).

3.2.4 Produção de espuma

A espuma, em seu processo de formação, prescinde de surfactantes, pois, como foi levantado por Cook e Boening (1987) e Gerard (2003), o aprisionamento de bolhas de gás, em excesso motivado pelos agentes superfície ativa, pode ocorrer em um menor grau ou mesmo não se verificar sem que isto seja determinante na produção da camada de materiais flutuantes. No entanto, se houver quantidade significativa de surfactantes na massa líquida, materiais que formariam a espuma, por surgir flutuando na superfície, passam a agir estabilizando a espuma se estiverem enevoados de gases (MOEN, 2003; BARBER, 2005).

Nesse sentido, em situação de concentração reduzida de surfactantes, os materiais de massa específica menor que a da água (óleos, graxas, gorduras, materiais vegetais particulados, cabelos, borrachas, entre outros), apresentando uma tendência natural de flutuar e sendo de biodegradação mais demorada, podem se desvencilhar da massa biológica em digestão e subir no reator em direção à superfície, formando espuma. A sua velocidade de subida eventualmente seria intensificada por fluxos ascensionais, como, por exemplo, pelas correntes de gases biológicos gerados no tratamento anaeróbio ou mesmo por correntes hidráulicas.

O próprio lodo biológico ou biomassa ativa pode contribuir à camada de espuma se o processo de flotação a partir de gases, que são gerados ou introduzidos continuamente no sistema, conseguir ser efetivo (VAN HAANDEL e MARAIS, 1999; HALALSHEH *et al.*, 2005). Além disso, esse lodo biológico, constituído por agregados de microrganismos, tem sua estabilidade, do ponto de vista da permanência na zona de digestão, influenciada por fluxos hidráulicos ascendentes. Estes fluxos, tais como correntes verticalizadas em reatores de fluxo ascendente, tenderiam a elevar os agregados biológicos no perfil do reator, chegando a contribuir para a camada de materiais flutuantes, que é a espuma (HWU *et al.*, 1998b; MAHMOUD *et al.*, 2003).

Dessa forma, líquidos com elevadas concentrações de óleos e graxas, gorduras, 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.

3.2.5 Acumulação de espuma

Uma vez que um pouco de espuma é formada, começam a agir processos naturais de decomposição da camada, tendendo a diminuir sua acumulação na superfície dos reatores. Cook e Boening (1987) relatam que alguma quantidade de espuma pode ser digerida por meio de mistura e temperatura adequadas. Os mesmos autores, em concordância com Moen (2003), chegam a afirmar que a chave para o combate do acúmulo da camada de espuma é uma boa mistura, por mantê-la dispersa.

Ainda Cook e Boening (1987) informam que se a camada de espuma apresenta-se úmida, bolhas de gases ascendentes conseguem vencer sua resistência, perturbando o processo natural de espessamento da camada. O grau de umidade ou, pelo contrário, o grau de solidificação da espuma depende de fatores como a concentração de óleos e graxas no afluente, a intensidade da mistura atingindo a camada, a frequência de limpeza e o tipo de cobertura do reator. Camadas de espuma submergidas são normalmente menos solidificadas do que as não submersas, portanto mais facilmente misturadas e digeridas (COOK e BOENING, 1987).

Depreende-se dessas referências que uma camada de espuma, depois de formada, acumulará em intensidade na superfície de um reator, se não houver uma mistura satisfatória que a disperse. Um processo que parece fundamental nesse contexto é o da biodegradação, o qual se verá dificultado se a camada se constituir solidificada, com compostos de biodecomposição lenta e com taxa de formação muito alta.

3.3 Escuma em digestores anaeróbios

3.3.1 Reatores anaeróbios tratando lodos de sistemas de lodos ativados

Antes de levantar referências envolvendo “escuma de digestores anaeróbios de lodos”, mas sem sair do tema “escuma em sistemas de lodos ativados”, é relevante destacar a formação de espuma em decantadores primários. Uma justificativa adicional é que nesses sistemas a espuma dos decantadores primários é normalmente enviada para os digestores de lodo.

Metcalf e Eddy (1991) reportam a necessidade de se proceder a uma mistura da espuma antes de bombeá-la isoladamente, a fim de garantir a homogeneidade do material. Essa informação fornece uma dimensão da heterogeneidade da espuma em questão. Na mesma referência,

citam-se os valores de sólidos totais (ST) típicos para a espuma, os quais variam numa faixa de 3,0 a 10,0 %, sendo o valor mais típico de 5,0 %. Dessa forma, a espuma de decantadores primários é bastante concentrada de sólidos de diferentes tipologias, no entanto possui ainda muita água em sua constituição.

Moen (2003), por sua vez, cita que os sólidos removidos como camada sobrenadante no tratamento primário contêm óleos, graxas e gorduras, os quais em sendo enviados para digestores de lodo motivarão a constituição de uma camada de espuma em seu topo, sobretudo se a mistura no digester for inadequada. Tal caso é uma indicação de que se os materiais de uma camada de espuma, acumulada em um reator inicial, forem retirados e enviados para um segundo reator, encontrando condições propiciatórias, voltam a formar espuma.

Considerando, portanto, que os digestores de lodo recebem espumas geradas em outras unidades do sistema conjuntamente com a grande massa de lodos, a produção de espuma tende a ser uma constante. Esses lodos afluentes, primários e secundários, embora se constituam de materiais que se sedimentaram, podem ainda apresentar potencial de fluabilidade e/ou flotabilidade. Neste aspecto, Van Haandel e Marais (1999) e Gerard (2003), em definições para digestores anaeróbios de lodo de baixa carga em sistemas de tratamento de esgotos, identificam a camada de espuma como um dos extratos que naturalmente se desenvolve resultante do processo.

A relevância do problema da camada de espuma para digestores anaeróbios de lodo é tamanha que influencia inclusive, em nível de projeto, na definição do formato do reator e no tipo de cobertura. A cobertura flutuante tende a minimizar a acumulação da camada de espuma, especialmente em conjunção com uma boa mistura, pois a espuma se mantendo submersa e menos solidificada facilita a mistura e digestão (COOK e BOENING, 1987).

O formato ovalado tem se tornado preferido por projetistas e operadores, em relação ao cilíndrico, devido à facilidade no controle da espuma e melhor mistura concitados pelas paredes laterais de elevada inclinação (COOK e BOENING, 1987; METCALF e EDDY, 1991; LUDUVICE, 2001). A Figura 3.1 mostra um esquema do digester anaeróbio de lodo em formato de ovo, o qual em sua parte superior proporciona uma área de espuma controlável.

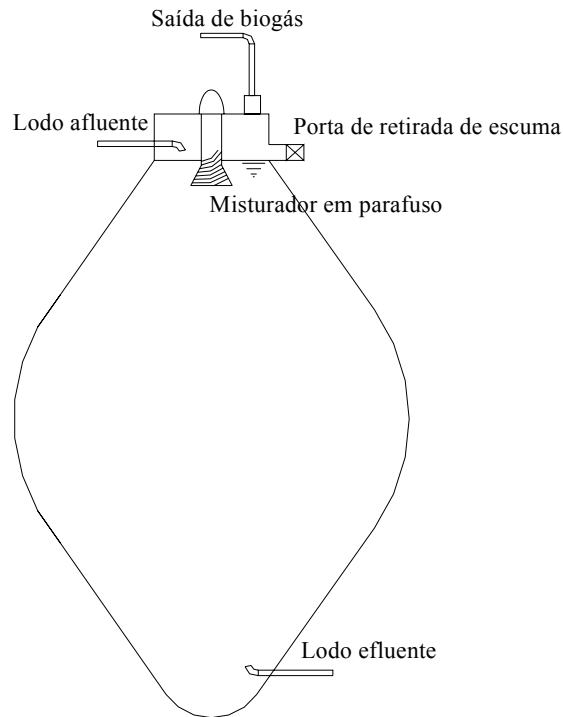


Figura 3.1 – Esquema de digestor anaeróbio ovalado e sua região superior para controle da camada de espuma

Fonte: adaptado de COOK e BOENING (1987)

Três possíveis métodos de gerenciamento da espuma para o digestor ovalado são relatados por Cook e Boening (1987). Primeiramente a afluência do lodo a ser digerido pelo topo do reator proporcionando uma “quebra” da camada de espuma. O segundo é um pequeno dispositivo misturador em parafuso, também no topo, direcionando a espuma para baixo a fim de atingir o volume útil em digestão e, assim, degradar os materiais flutuantes possíveis. Por último, com a intenção de remover materiais flutuantes não degradáveis acumulados, existe uma porta para retiradas periódicas de espuma. O espírito que anima toda essa providência com a problemática da espuma é o de conseguir livrar o digestor da acumulação da espuma sem que ele saia de serviço.

Segundo Metcalf e Eddy (1991), é fundamental que digestores de lodo possibilitem um controle da camada de espuma formada. Em assim sendo, dispositivos de quebra-espuma são instalados nos reatores, com o mesmo intuito dos dois primeiros métodos utilizados no digestor ovalado descrito acima. O relato de Metcalf e Eddy (1991) refere-se a bocais que direcionam um fluxo bombeado de lodo a fim de desconstituir a camada de espuma e eventualmente permitir que ela entre no processo de digestão. Outra experiência semelhante, entretanto, aplicada a digestores aeróbios autotérmicos, é a de Pinto (2001). Segundo o autor,

um sistema simples de controle da camada de espuma é necessário para esses reatores. Tal sistema constitui-se de uma hélice mecânica instalada no interior do reator com a finalidade de quebrar a espuma em um determinado nível de altura.

A seu turno, Cook e Boening (1987) recomendam a recirculação do biogás do digestor para controle da camada de espuma, por potencialmente provocar uma melhor mistura. Uma mistura otimizada no digestor para minimizar acúmulo de espuma é realmente um consenso na literatura, inclusive enfatizado por Ludovice (2001). Todavia, não pode ser desprezado um possível efeito de carreamento e ou flotação dos sólidos na condição de excessivos níveis de bolhas de gás no digestor, o que seria fator de formação de espuma.

Concluindo, a operação e projeto de digestores de lodo vêm, há algum tempo, demonstrando preocupações com a formação e acúmulo da camada de espuma. Algumas soluções técnicas foram propostas e estão sendo usadas, porém um grande consenso ainda não existe nessa área de conhecimento.

3.3.2 Reatores tratando resíduos líquidos em geral

A formação e acumulação de espuma em digestores anaeróbios que tratam outros quaisquer resíduos na forma líquida é bem variada no que diz respeito às quantidade e qualidade, como função da grande multiplicidade de tipologias de reatores e principalmente características dos afluentes. O laço comum que une esses digestores é o objetivo de produção de metano (biometanização) para o seu aproveitamento energético, a partir de um substrato bastante particulado.

A experiência indiana com os digestores para produção de biogás, relatada por Raman *et al.* (1989) citando Rankin (1947), é bastante antiga, assim como as ocorrências de espuma nos mesmos. Porém as informações são de que nem sempre a camada de espuma se constituiu em problema grave, na medida em que ou a mesma era ausente ou o operador do sistema aprendeu a mantê-la sob controle.

Ainda Raman *et al.* (1989) relata problemas ocasionados por espuma nos digestores anaeróbios relacionados com a produção desuniforme de biogás, o entupimento de tubulações de saída e espaços excessivos ocupados que comprometem a capacidade de digestão. No entanto, o autor prossegue reportando que apesar desses possíveis problemas, a formação de

escuma ainda não havia sido examinada em detalhes ao nível de campo. A sua justificativa para esse fato é a de que a formação de escuma pode não ser tão severa a ponto de impedir completamente a produção de gás, ou a taxa de formação de escuma pode ser muito baixa e conseqüentemente o efeito sobre a produção de gás é sentido somente muitos anos depois.

Em seu trabalho, Ong *et al.* (2000), confirmou a ocorrência de formação de três estratos dentro de digestores não agitados, quais sejam, uma camada de fundo de lodo concentrado, outra camada intermediária pouco concentrada de particulados, a qual seria o sobrenadante, e a camada viscosa de escuma no topo. O afluyente ao digestor anaeróbio foi esterco bovino na concentração média de 80 g/l de sólidos totais.

Adicionalmente, em comparação com um reator igual, com o diferencial da agitação contínua, o digestor não misturado revelou produção maior de biogás. A explicação para isso é em função da estratificação do conteúdo e sua saída posicionada na camada intermediária, pouco concentrada de particulados, potencializando o tempo de retenção de sólidos e conseqüentemente o aproveitamento para a metanização das partículas biodegradáveis. Portanto, a interessante informação dessa referência é que a camada de escuma constituída no topo contribui também para o processo de biometanização, ou seja, a escuma sofre processos de biodegradação.

Este relato viria de encontro à preocupação de Raman *et al.* (1989) com os potenciais problemas de escuma em digestores, especialmente com aqueles de diminuição da produção de biogás e redução na capacidade de digestão. Contudo, como a duração dos experimentos de Ong *et al.* (2000) foi de apenas 40 dias, pode-se verificar uma concordância com a justificativa do mesmo Raman *et al.* (1989) atinente à baixa severidade da camada de escuma a ponto de obstar a liberação de gases em tempos não muito prolongados.

A seu turno, digestores que usam cascas de ervilhas verdes para produção de biogás foram pesquisados por Madhukara *et al.* (1997), sendo que antes se verificava a formação de espessa camada de escuma no topo, provocando um bloqueio das portas dos digestores. Uma solução testada nos experimentos desenvolvidos foi a de ensilagem (aterramento em cova por 6 meses ou 15 dias) prévia dos resíduos a fim de remover os constituintes fibrosos e reduzir o tamanho das partículas das cascas de ervilhas verdes. De fato, tal procedimento demonstrou minimizar a formação de escuma, contribuindo para a maior produção de biogás e metano.

A evolução da busca por uma técnica de controle da camada de espuma formada em digestores anaeróbios na Índia alcançou a simplicidade de um dispositivo estático de quebra-escuma. Assim, para digestores de cúpula fixa, uma rede de nylon com estrutura em malha retangular fixada na região de desenvolvimento da camada de espuma é instalada com o intuito de periodicamente desconstituir a camada flutuante, a qual se movimentava para cima e para baixo com a variação do nível interno do conteúdo do digestor.

Esta experiência é sistematizada, também, em Raman *et al.* (1989). Assim, tratando esterco bovino diluído, dois digestores em escala real foram comparados, um que possuía a rede de quebra-escuma e outro que não possuía. Com um método de avaliação de performance de produção de biogás demonstrado no estudo, foi concluído que o digestor com a rede de nylon combatendo a camada de espuma teve um desempenho significativamente melhor.

Com isso, entende-se que mesmo que a camada de espuma não aponte para um grande problema presente, se dispor de reservas técnicas para o seu controle pode ser prudente. Inclusive, eventualmente, proporcionando melhorias no desempenho dos sistemas de biometanização de resíduos em geral.

3.4 Escuma em reatores UASB

3.4.1 Aspectos gerais

A ampla utilização da tecnologia de tratamento de águas residuárias por meio de reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (reatores UASB), em função das propaladas inúmeras razões positivas da técnica, tem revelado problemas de operação e manutenção como é o caso da acumulação excessiva de camada de espuma na superfície do reator. Essa espuma ou se desenvolve na superfície líquida da subunidade de decantação ou na superfície líquida da subunidade de coleta de gás (interior do separador trifásico) ou em ambas. De uma maneira geral e inicial, tal espuma pode ser entendida como uma camada de materiais em condição flutuante.

A ocorrência de espuma em reatores UASB tem sido reportada tanto para efluentes industriais (LAUBSCHER *et al.*, 2001) como para efluentes domésticos (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994; SATO *et al.*, 2005; VERSIANI, 2005). Van Haandel e Lettinga (1994) e Versiani (2005) chegam a afirmar que para a maioria dos casos de tratamento de esgotos em

reatores UASB o aparecimento de uma camada de espuma na superfície do reator se apresenta real.

A partir de experiência com reator UASB tratando esgotos domésticos, SANTOS *et al.* (2003) definem a camada de espuma que flutua na superfície líquida. Tal seria resultante de parte dos sólidos contidos no afluente, compostos por óleos, graxas e outros materiais, que em mistura com gases, emergiriam. Em concordância com esse conceito, a caracterização da espuma nos reatores UASB em escala real, tratando esgotos domésticos, feita por Pagliuso *et al.* (2002), é a de aparentemente constituída de cabelo, graxa e outros materiais ainda grosseiros.

Por sua vez, Van Haandel e Lettinga (1994) desenvolvem o entendimento da espuma acumulada nos reatores UASB, tratando também esgotos domésticos, de forma muito atrelada à questão do lodo flotante ou flutuante. Contudo, HWU *et al.* (1998b) relata em experimentos com reatores EGSB (Expanded Granular Sludge Bed), os quais se constituem em um tipo particular de reator UASB, que além de grânulos de lodo, materiais gordurosos se incluíam na matéria flutuante acumulada na superfície do reator.

Portanto, analisando-se os conceitos supracitados por meio do entendimento sobre o que é espuma, desenvolvido no item “Definição de espuma” dessa revisão, pode-se enquadrar a camada de materiais flutuantes, normalmente verificada em reatores UASB, como espuma típica. Isto é, a camada potencialmente heterogênea que se origina de materiais particulados provindos do afluente ou de lodo biológico gerado no processo de tratamento, a partir da característica comum de baixa densidade, e intensificada por fluxos fluídicos ascensionais, de água ou gás, constitui-se em espuma.

Nesse sentido, para se avançar no aprimoramento da tecnologia de reatores UASB, há que se preocupar em acomodar a acumulação da camada de espuma gerada (LAUBSCHER *et al.*, 2001). Vários outros autores comentam da necessidade de remoção mais freqüente da camada espuma como uma postura de operação e manutenção mais racional (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994; FLORENCIO *et al.*, 2000; LAUBSCHER *et al.*, 2001; SATO *et al.*, 2005).

3.4.2 Princípios do funcionamento de reatores UASB

Os reatores UASB são unidades que se prestam fundamentalmente à remoção de matéria orgânica carbonácea (DQO ou DBO traduzidos por carboidratos, proteínas, lipídeos ou seus metabólitos) em suspensão ou dissolvida nas águas residuárias. Em seu interior, o fluxo hídrico é ascendente, isto é, a água residuária bruta é lançada na parte de fundo e o efluente tratado tem saída na parte mais superior do reator.

Assim, entre os níveis de entrada e saída de líquido, no perfil do reator, é que se desenrolam todos os processos físicos e bioquímicos, os quais determinam a eficiência de remoção ou tratamento da matéria carbonácea. Esse perfil caracteriza-se por uma distribuição do lodo biológico, o agente do tratamento, variando de muito denso e com partículas granulares de elevada capacidade de sedimentação, próximas ao fundo, até uma distribuição mais dispersa e com partículas leves, próximas ao topo do reator. A região de lodo concentrado, ao fundo, denomina-se leito de lodo e a região de lodo disperso, mais superiormente, denomina-se manta de lodo (CHERNICHARO, 1997).

A remoção dos sólidos da matéria orgânica, no reator UASB, se dá por sucessivas e encadeadas conversões bioquímicas após a sua difusão e/ou aderência sobre massa bacteriana presente na zona de digestão. Em linhas gerais, a degradação completa da matéria carbonácea acontece às custas da conversão dos sólidos orgânicos mais complexos a um produto sólido, isto é, crescimento do lodo biológico, e a produtos gasosos misturados (biogás), principalmente, metano, gás carbônico e sulfeto de hidrogênio. Na seqüência, tais subprodutos tendem a subir no perfil do reator, o biogás imediatamente e o lodo com o passar do tempo, e se não forem conduzidos corretamente podem prejudicar a eficiência do processo.

O elemento diferencial e mais característico do reator UASB e que lhe subdivide em três zonas ou subunidades é o separador de fases (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994). A zona de digestão já foi descrita acima, as demais são a zona de sedimentação ou decantação e a zona de liberação do biogás. O fluxo ascensional ao atingir o separador trifásico deve ser composto idealmente por uma mistura de efluente líquido tratado, poucas partículas de lodo carregadas e biogás gerado. Assim sendo, a razão de ser do dispositivo separador trifásico é a separação dos gases contidos na mistura líquida, de tal forma que uma zona propícia à sedimentação seja criada no extremo superior do reator (CHERNICHARO, 1997).

Na seqüência, 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.

Por sua vez, o biogás separado na altura do início do separador trifásico adentra em seu interior percorrendo a massa líquida até atingir a superfície de interface líquido-gás, através da qual irá se desprender para a fase gasosa, devendo ser, posteriormente, conduzido a algum tipo de tratamento e/ou aproveitamento, sobretudo do valor energético do metano. Flocos de lodo, eventualmente aderidos às bolhas, podem subir até a interface, mas, após o desprendimento do gás, tenderão a sedimentar para novamente fazer parte da massa de lodo na zona de digestão (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

Por fim, o grande mérito do reator UASB é tratar águas residuárias por via anaeróbia, isto é, na ausência de oxigênio, com geração de metano no biogás e com baixo crescimento celular, em alta taxa, ou seja, com baixos tempos de detenção hidráulica (TDH), mas com elevados tempos de retenção de sólidos (TRS). Entretanto, apesar do baixo crescimento celular, periodicamente deve-se remover o lodo biológico em excesso, desidratando-o, por exemplo, em leitos de secagem, e mantendo uma massa biológica mínima para dar continuidade ao tratamento. A Figura 3.2 ilustra as partes físicas componentes do reator UASB e sua dinâmica normal. O outro subproduto do tratamento é a espuma, a qual deve também ser adequadamente gerenciada.

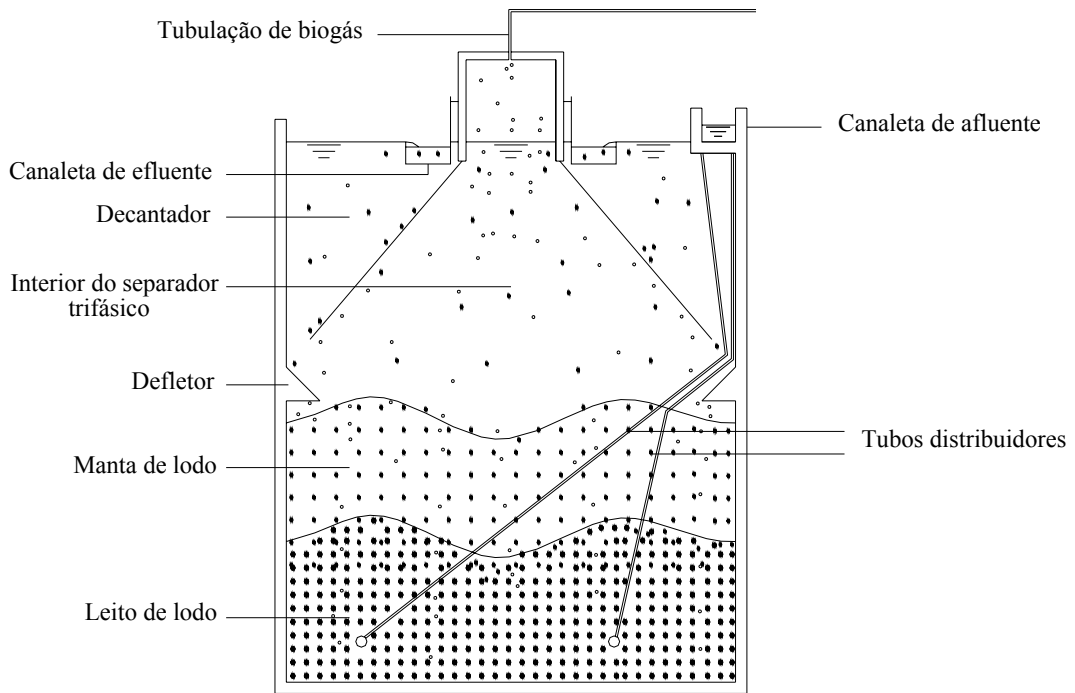


Figura 3.2 – Corte esquemático de um reator UASB convencional

3.4.3 Escuma do decantador versus escuma do separador

A escuma em reatores UASB pode se constituir e acumular em dois locais distintos. Tais locais se situam nas interfaces líquido-gás, seja na do interior do separador trifásico, seja na da unidade de decantação, isto é, nas regiões das superfícies líquidas. Na medida em que tais locais estão no contexto de subunidades bastante distintas no que diz respeito ao ambiente criado e a sua função no reator, as possíveis camadas de escuma aí desenvolvidas tenderão a apresentar diferenças entre si, seja quanto aos caracteres quantitativos ou qualitativos. A Figura 3.3 mostra o mesmo esquema em corte de reator UASB acrescido das camadas de escuma constituídas nas superfícies do interior do separador trifásico e do decantador.

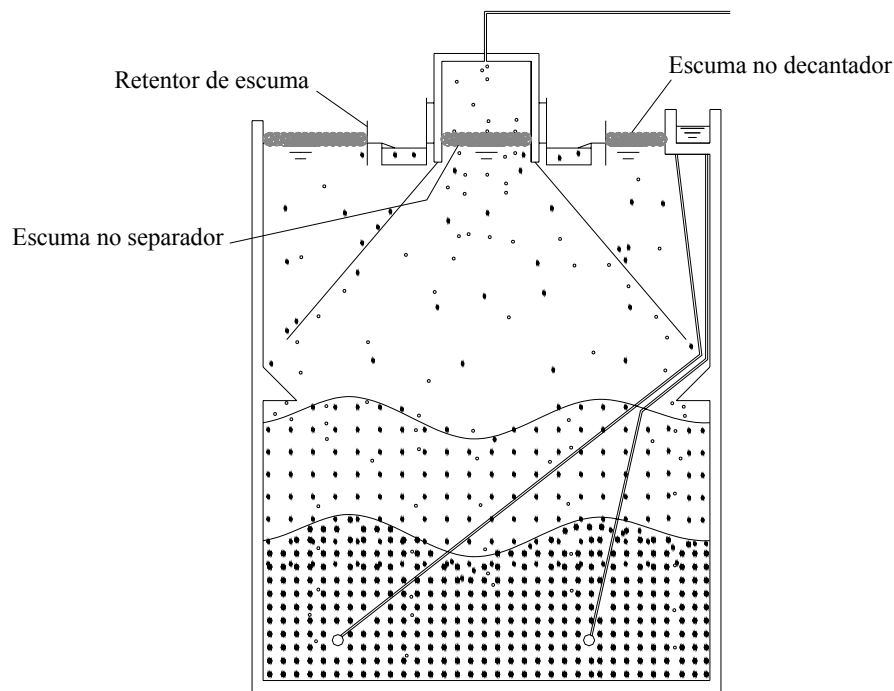


Figura 3.3 – Corte esquemático de um reator UASB com a vista da espuma no decantador e interior do separador

Primeiramente, para que a espuma tenha condição de se formar plenamente na superfície da unidade de decantação há que ter sido previsto um retentor de espuma – dispositivo complementar à calha vertedora do efluente final – ou uma forma de saída do efluente tratado por via submersa (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994; CHERNICHARO, 1997). Assim sendo, os materiais leves que subam conjuntamente com o esgoto tratado, já praticamente sem os gases, podem não sair com o efluente final, em função da proteção, contribuindo à camada de espuma.

Segundo Van Haandel e Lettinga (1994), no caso do reator UASB do Pedregal, com abstração do efluente subsuperficial, uma camada de materiais flutuantes persistiu durante todo o período operacional. Esses mesmos autores informam que, para a maioria dos casos investigados de tratamento de esgotos em reator UASB, é verificada uma camada de espuma no decantador (superfície do reator). Também, Versiani (2005) relata sobre acumulação de espuma no decantador de reator UASB como resultado da existência do retentor superficial. Portanto, talvez em função da facilidade de se visualizar a superfície do decantador de um reator UASB, parece haver consenso de que a espuma do decantador é uma realidade.

Por sua vez, no interior do separador trifásico, normalmente, por se tratar de uma subunidade fechada à saída de líquido, há naturalmente a possibilidade de uma camada de espuma se formar quando os sólidos atingirem a superfície líquida. Em sendo superficialmente fechada, as mais das vezes, e, em alguns casos, de muito difícil acesso, nem tantos relatos se têm para a espuma formada nessa superfície. Não obstante, segundo Van Haandel e Lettinga (1994), em alguns casos (Cali – Colômbia e Kampur – Índia) observou-se a formação de uma camada grossa de espuma desenvolvida na interface do interior dos elementos de separação de fases. A seu turno, Pagliuso (2002) cita que só houve identificação de uma relevante camada de espuma no separador, quando efeitos danosos desse fato foram percebidos no sistema.

Os estudos experimentais como os realizados por Hwu *et al.* (1998b), por serem de pequena escala, permitem um acompanhamento mais de perto, também, da espuma do interior do separador trifásico. Assim, Hwu *et al.* (1998b) comenta sobre acumulação de espuma tanto no sedimentador como no coletor de gás, e sobre as remoções necessárias. Por sua vez, alguns reatores UASB são encontrados totalmente abertos no compartimento de gases ou com acessibilidade possibilitada. Tais situações permitiram que alguma investigação sobre a acumulação da espuma nessa subunidade fosse feita de forma facilitada por Rocha (2002) e por Santos (2003). A única camada de espuma investigada nesses estudos foi a do separador, na medida em que não havia retenção da mesma na subunidade de decantação.

Entre estas duas subunidades, particularmente na região de formação de espuma, há diferenças funcionais importantes. Enquanto que na superfície do decantador não há, ou teoricamente não deve haver, grandes desprendimentos de gases, na superfície do interior do separador há um importante desprendimento dos gases gerados na digestão. Neste respeito, tanto Van Haandel e Lettinga (1994) quanto Chernicharo (1997) trazem informações técnicas sobre os valores da taxa de liberação de biogás, os quais estão bastante atrelados à camada de espuma acumulada. Conseguem-se depreender por essas referências que a liberação de gases no interior do separador poderia ter um efeito controlador sobre a espessura e consistência da camada de espuma.

Diferenças entre as duas subunidades podem também ser levantadas do ponto de vista do fluxo fluídico. Se no interior da unidade de separação trifásica há um mais intenso fluxo gasoso ascendente e a conseqüente liberação dos gases na superfície, na unidade de decantação há um mais intenso fluxo hidráulico ascendente e a conseqüente saída de líquido.

As implicações dessas diferenças sobre as características quantitativa e qualitativa das escumas formadas e acumuladas não são exploradas por nenhuma das referências consultadas. Assim como também não se exploram as possíveis implicações das diferenças de constituição do espaço gasoso superior às camadas de espuma, criadas pela operação normal de um reator UASB.

3.4.4 Inconvenientes da espuma em reatores UASB

Uma camada de espuma que se desenvolva sem controle na superfície de reatores UASB pode vir a provocar inconveniências ao correto funcionamento do reator, algumas mais amenas e outras bastante agudas. Isto é uma verdade patente, por exemplo, porque após avaliar 16 sistemas envolvendo reatores UASB tratando esgotos domésticos na Índia, Sato *et al.*(2005) formularam um diagnóstico da eficiência de tratamento do sistema e fizeram um prognóstico de melhoria do processo, segundo o qual a remoção da espuma que se acumulou no topo dos reatores deve ser realizada periodicamente. Reforçando o exemplo acima, para sete novas concepções de ETE da SANASA de Campinas-SP que prevêm reatores UASB, uma preocupação constante dos formuladores foi de minimizar o acúmulo de espuma nos reatores por meio de procedimentos preliminares ou dispositivos internos (GRANDIN, 2005).

A espuma que se forma no decantador de um reator UASB tende a se perder junto com o efluente se nenhum dispositivo de retenção dessa espuma for previsto, conseqüentemente gerando uma piora na qualidade do tratamento. Segundo Van Haandel e Lettinga (1994), a função dos retentores de espuma é evitar que o material flutuante seja descarregado junto com o efluente.

Assim sendo, em relato de Van Haandel e Lettinga (1994), em Kampur na Índia, uma investigação comparando o desempenho de um reator com retentores de espuma e outro igual sem os retentores, constatou que o reator UASB com os retentores teve uma melhoria marginal na qualidade do efluente. Portanto, a conclusão a esse respeito foi a de que, para as condições operacionais em Kampur, não havia grande vantagem em colocar o retentor.

Talvez, uma indicação interessante desse trabalho seja a de que se pode conseguir impedir a acumulação de espuma no decantador do reator, com a supressão da retenção, sem grandes comprometimentos sobre a qualidade do efluente, para determinadas condições operacionais do reator tratando esgotos sanitários. No entanto, Laubscher *et al.* (2001), realizando estudos

com tratamento de águas residuárias da destilação de cereais em reatores UASB, perceberam que uma espessa camada de espuma interferiu com o efluente transbordante no clarificador. Isto é, mesmo com o retentor de espuma a espessura excessiva da camada de espuma conseguiu prejudicar a qualidade do efluente final.

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. Adicionalmente, Van Haandel e Lettinga (1994) referem-se ao desenvolvimento de uma camada de espuma grossa e dura, motivada por taxas de liberação de gases muito baixas, que com o tempo pode vir a dificultar o desprendimento do biogás gerado no processo.

Essa realidade de dificuldade de saída do biogás pela superfície líquida é comentada nos trabalhos de Santos *et al.* (2003) e por Hwu *et al.* (1998b). Inclusive, neste último trabalho de caráter experimental, houve a necessidade de remoção diária dos materiais flutuantes acumulados, de forma a evitar bloqueios no coletor de biogás. Todavia, o efeito mais impressionante de uma camada de espuma acumulada no interior do separador de um reator UASB é citado por Pagliuso *et al.* (2002). Segundo esses autores, após dois anos de operação de um sistema em escala real na cidade de Piracicaba, um tampão formou-se dentro do separador trifásico, provocando um bloqueio total do caminho normal do gás no reator, sendo notado por expressivo borbulhamento na superfície dos reatores.

Por outro lado, há uma convergência entre as duas maiores referências nacionais para tratamento de esgotos em reatores UASB, quais sejam, os trabalhos já citados de Van Haandel e Lettinga (1994) e Chernicharo (1997), de que uma taxa de liberação de gases muito alta pode também ser inconveniente. O prejuízo provocado por essa situação seria o de entupimentos na tubulação de saída de gases criados pelos sólidos da camada de espuma, por exemplo, lodo, que atingissem os dispositivos de remoção de gás.

Um outro problema ocasionado por acúmulo descontrolado de espuma em reatores UASB seria o espaço ocupado pela camada, redundando em perda de volumes importantes para os processos. Nesse sentido, Santos *et al.* (2003) concluem de seu trabalho, o qual mediu a acumulação de espuma no interior do separador trifásico de um reator tratando esgotos domésticos, que a unidade perde aproximadamente 3 centímetros por mês de sua altura útil. A hipótese de que a camada de espuma cresceria unicamente para cima da superfície líquida parece não ser verdadeira, na medida em que um outro estudo, realizado por Rocha (2002),

mediu a espessura da camada e constatou que do total de 63 centímetros acumulados, apenas 18 eram emersos, enquanto 45 centímetros eram submersos. Portanto, a camada de espuma desenvolvida no interior do separador não somente provocou perda de volume de espaço gasoso, como também de espaço líquido. Em ambos casos acima relatados, o espaço gasoso do separador não operava pressurizado.

3.4.5 Fatores potencialmente intervenientes na produção, acumulação e na constituição da espuma de reatores UASB

3.4.5.1 Concentração do afluente

Há indícios de que a taxa de acumulação de espuma depende das características do esgoto afluente (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994; VERSIANI, 2005). Nesse sentido, Van Haandel e Lettinga (1994) verificam uma substancial diferença na acumulação de espuma para o interior do separador trifásico entre dois reatores UASB, um em Cali, Colômbia e outro em Kampur, Índia. A suposição revelada, para explicar a alta taxa relativa de acúmulo de espuma no reator de Kampur, foi baseada no afluente ao sistema de tratamento que estaria excessivamente concentrado por restos de animais dos numerosos curtumes da cidade.

Em seus estudos com tratamento de águas residuárias de destilarias, Laubscher *et al.*(2001) investigaram o efeito do conteúdo de sólidos suspensos totais (SST) do afluente sobre a intensidade da produção e acumulação de espuma na superfície de reator UASB. Para isso, dois tipos de águas residuárias foram utilizados, quais sejam, água residuária de “grãos” e água residuária de “vinho”. Além disso, as águas residuárias, antes de serem aplicadas aos reatores UASB na escala de bancada, foram submetidas a alguns tipos de pré-tratamentos (centrifugação, sedimentação, filtração e mistura). Tal fato gerou uma variedade de afluentes com diversos conteúdos de SST, os quais foram aplicados em diferentes períodos experimentais.

Os resultados demonstraram que a intensidade ou espessura da camada de espuma acumulada dependeu fundamentalmente da composição do substrato, isto é, do conteúdo de sólidos (SST) na água residuária. Adicionalmente, se verificou que para a água residuária de vinho isoladamente nenhuma camada de espuma foi formada, sendo este afluente o que apresentava a menor concentração de sólidos suspensos. Com relação à constituição da camada de

escuma, a descrição citada no trabalho foi geral, não deixando transparecer que tivesse havido diferenças expressivas entre as diferentes alimentações efetuadas no que tange a esse aspecto.

Outro comentário importante é o de Mahmoud *et al.* (2003), o qual vem complementar a conclusão de Laubscher *et al.* (2001), na medida em que levanta a cadeia causal de formação de espuma quando elevadas cargas de sólidos são aplicadas aos reatores UASB. Mais explicitamente, a elevada carga de sólidos, impondo baixos tempos de retenção de sólidos (TRS), alterariam a composição do leito de lodo (microbiológica, física e quimicamente) e causariam acumulação de substâncias flotáveis (lipídeos e proteínas).

No, já citado, trabalho de avaliação de 16 sistemas de tratamento de esgotos sanitários na Índia, a acumulação de camada de espuma no topo dos reatores UASB é reportada como de caráter generalizado (SATO *et al.*, 2005). Talvez possa haver alguma relação da generalizada e inoportuna camada de espuma verificada nas unidades com o fato dessas águas residuárias serem consideradas de elevada e média força, possivelmente em função das conhecidas contribuições de efluentes industriais, acrescendo-se às concentrações mais normais de matéria orgânica e de sólidos suspensos. Por sua vez, Pagliuso *et al.* (2002) descrevendo a aparente constituição da camada de espuma encontrada nos reatores UASB da ETE Piracicaba, aventa que os materiais componentes seriam aqueles trazidos no afluente por não ficarem retidos pelas unidades de tratamento preliminar.

Uma das estratégias utilizadas nas concepções de várias ETE da SANASA em Campinas-SP foi a de maximizar a remoção de sólidos gradeáveis nas unidades de tratamento preliminar. Assim, o espaçamento entre barras foi reduzido de 70 mm para 20 mm e de 10 mm para 3 mm, respectivamente, para os gradeamentos grosseiro e fino (GRANDIN, 2005). Destarte, o que se subentende com a opção é que se pretende diminuições da concentração do afluente, particularmente de sólidos suspensos (SS), e do tamanho dos sólidos particulados que adentram ao reator, esperando, como consequência, uma minimização da formação e acumulação de espuma. Por outro lado, com toda certeza, o gerenciamento desse tratamento preliminar ficará mais dificultado.

3.4.5.2 Constituição específica da matéria orgânica afluente

A matéria orgânica afluente aos reatores biológicos, essencialmente, se divide em três grandes grupos: carboidratos, proteínas e lipídeos. Talvez, os constituintes mais problemáticos em

termos de tratamento sejam os lipídeos. No que tange a formação de espuma, segundo Zeeman e Sanders (2001) os lipídeos são causadores de ocorrências potencialmente graves, devido o seu baixo peso específico.

Como já definido anteriormente, um dos contribuintes à espuma são os agregados de lodo biológico que flotaram. Assim, os lipídeos passam a ser fatores intervenientes na produção de espuma, pois que, segundo Perle *et al.* (1995) a flotação de lodo, entre outras coisas, é atribuída à presença de gorduras. Na mesma linha de pensamento, Lettinga e Hulshoff Pol (1992) citados por Hwu *et al.* (1998a), especulam que a adsorção de ácidos graxos de cadeia longa (AGCL), os quais são subprodutos da hidrólise de lipídeos, sobre lodo granular é razão para flotação e/ou lavagem de lodo.

Segundo os experimentos de Hwu *et al.* (1998a), verifica-se uma concordância com a citação acima, retirada do seu trabalho. De fato ele vai mais além, por meio de experimentos com reatores UASB em fluxo contínuo, mostrando que para maior carga aplicada de AGCL, uma maior flotação de lodo ocorria e um menor tempo era requerido para uma completa flotação. Adicionalmente, nesse trabalho, é sugerido que a completa flotação do leito de lodo é possivelmente verificada antes da inibição da metanogênese.

Nessas condições se teria a acumulação de uma camada de espuma com muito lodo, o qual estaria impregnado com material lipídico. Por outro lado, Hwu *et al.* (1998b) suportam, a partir de experimentos, que a flotação de lodo pode ser reduzida por meio de mais longos tempos de detenção hidráulica (TDH), devido a uma minimização da adsorção excessiva de AGCL, os quais passam a ser melhor biodegradados. Na verdade, talvez sejam maiores TRS os minimizadores de formação de espuma a partir de flotação de lodo, pois nessa condição há também uma melhoria na remoção de lipídeos (HALALSHEH *et al.*, 2005).

3.4.5.3 Projeto do reator

Uma primeira questão a ser analisada sobre projeto, até certo ponto, já foi discutida, ou seja, aquela com respeito ao emprego ou não do dispositivo retentor de espuma na subunidade de decantação. Como se colocou anteriormente, supostamente conseguir-se-ia a supressão da acumulação da camada de espuma com a não colocação do dispositivo, sem grandes prejuízos da qualidade do efluente final. No entanto, segundo Van Haandel e Lettinga (1994), é possível que a importância do retentor se torne maior para tempos de detenção hidráulica (TDH) mais

curtos, porque nessas condições seria mais provável que o lodo flotasse, devido à maior atividade e maior formação de bolhas dentro dos flocos.

Outro aspecto de projeto a influenciar na acumulação de espuma é o tipo de cobertura. Atualmente a grande maioria dos reatores UASB tem projeto de cobertura totalmente fechada por motivo de prevenção da exalação de maus odores. No entanto, aqueles que apresentam pelo menos a superfície da subunidade de decantação aberta podem ter influência das condições climáticas sobre a camada de espuma. Van Haandel e Lettinga (1994) comentam que a camada de espuma (lodo) desenvolvida no decantador do reator UASB do Pedregal foi ocasionalmente quebrada por ocorrências de chuvas fortes. Por outro lado, pode haver uma solidificação da camada de espuma, por exemplo, nos reatores que não dispõem de compartimentos herméticos de gases (CHERNICHARO, 1997). Tal parece ser o caso encontrado por Rocha (2002), ou seja, o coletor de gases apresentou uma camada densa de espuma solidificada.

Em nível de projeto de reatores UASB, também se define a área de influência dos tubos distribuidores do afluente no fundo do reator. A tendência esperada é que uma distribuição mais homogênea do esgoto no reator proporcione uma maior eficiência do tratamento, devido a um mais efetivo aproveitamento de todo o volume de digestão, por diminuir ocorrências de zonas mortas e curtos-circuitos. Em função dessa configuração, espera-se que menos espuma se forme e se acumule, pois que a digestão é otimizada e a flotação diminuída.

Dois trabalhos foram analisados comparativamente no que diz respeito à área de influência do tubo de distribuição do afluente e a correspondente espuma acumulada. Na verdade, como esses trabalhos não explicitaram a área de influência, mas de alguma forma deixaram margem para que tal parâmetro fosse estimado, calcularam-se os valores para cada. Para o caso de Santos (2003), com uma área de influência próxima de 4 m^2 , uma camada de espuma considerável e volumosa acumulou-se no separador. O outro caso, vivenciado por Versiani (2005), com uma área de influência de $1,64 \text{ m}^2$, uma camada de espuma bastante reduzida foi verificada no decantador do reator. Assim, apesar de terem sido verificadas em subunidades distintas, a grande diferença de acumulação de espuma pode ter explicação parcial na também muito diferente área de influência do tubo distribuidor.

A escolha do material do separador trifásico parece poder interferir no efeito de acumulação da espuma no seu interior. Esse fato é citado por Pagliuso *et al.*(2002), os quais levantam a

possibilidade da superfície áspera da fibra de vidro (material do separador dos reatores em questão) contribuir para o efeito que se verificou no sistema, isto é, formação de uma camada tampão no interior do separador trifásico. Eles ainda discorrem sobre o tema, dizendo que a suavidade superficial do aço inoxidável deveria ajudar a prevenir a constituição de tampões dentro do separador.

Objetivando-se evitar a flotação do lodo, as dimensões do separador trifásico devem ser tais que permitam a formação de uma interface líquido-gás no coletor de gases, suficiente para permitir a fácil liberação do gás retido no lodo (CHERNICHARO, 1997). Além disso, segundo Van Haaendel e Lettinga (1994), o nível de gás abaixo do separador determina a área da interface líquido-gás e, portanto, a taxa de abstração de gás nesta interface. Assim, levando-se em conta que a taxa de liberação de biogás tem uma interrelação com a camada de espuma, as dimensões do separador e o nível líquido (ou de gás) no seu interior, intervêm nos processos de formação e acumulação de espuma.

Ainda com relação à espuma acumulada no interior do separador, as concepções de ETE pela SANASA em Campinas-SP se previnem com adoção de dispositivos internos ao reator UASB, constituídos de calhas coletoras e tubulações para descarga de espuma até caixas externas (GRANDIN, 2005). Portanto, essa é uma preocupação com o controle da acumulação da camada de espuma que naturalmente tende a se formar.

Semelhante preocupação, manifestada de outra forma, é revelada por Pagliuso *et al.* (2002). Esse autor enfatiza que o projeto de portas de inspeção é uma questão chave para os separadores trifásicos uma vez que a facilidade de limpeza interna dessa parte do sistema e a prevenção de vazamentos dependem disso. Van Haaendel e Lettinga (1994) sintetizam a apreensão com esse tipo de incômodo dizendo que mesmo quando a taxa de formação de espuma não é alta, torna-se importante levá-la em consideração, projetando-se os separadores de fases de tal maneira que a remoção de espuma seja uma operação fácil.

3.4.5.4 Parâmetros de operação do reator

O TDH é um parâmetro fundamental para operação de reatores de tratamento. Ele define o tempo em que um volume infinitesimal de líquido permanece no reator, além disso, influencia sobre outros importantes parâmetros operacionais. Assim, TDH mais prolongados tendem a favorecer o processo da digestão anaeróbia em reatores UASB na medida em que as reações

bioquímicas envolvidas no processo são consideradas relativamente lentas. Portanto, espera-se que em TDH longos menos espuma se forme, pois que os sólidos serão removidos mais eficazmente, tendo menos chance de atingir a camada sobrenadante.

Normalmente, para reatores UASB, acréscimo e decréscimo no valor do TDH são seguidos de diminuição e aumento na velocidade ascensional, respectivamente. Assim, baixo TDH é acompanhado por elevada velocidade ascensional, a qual provoca arraste dos sólidos afluentes e da biomassa ativa (MAHMOUD *et al.*, 2003). Isso, por sua vez, pode intensificar o processo de formação de espuma na superfície do reator.

Na verdade, segundo Mahmoud *et al.* (2003), a velocidade ascensional tem 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 melhorar a eficiência de remoção de sólidos. Por outro lado, aumentando a velocidade ascensional poder-se-ia aumentar a força hidráulica cisalhante, a qual contraria o mecanismo de remoção de sólidos. O último efeito é retratado por Hwu *et al.* (1998b) em reator EGSB, para o qual em maior velocidade ascensional mais pedaços de lodo apareceram na zona de manta, assim como no decantador, como provável resultado do efeito de abrasão dos grânulos.

Por sua vez, no trabalho desenvolvido por Versiani (2005) com reatores UASB tratando esgotos sanitários, o aumento da velocidade ascensional (0,6; 0,8; 1,0 e 1,6) que se seguiu à diminuição do TDH (9; 7; 5 e 3), redundou em melhorias na remoção de sólidos suspensos totais até a fase operacional com 5 h e 1,0 m/h, respectivamente, para TDH e $V_{asc.}$. Com respeito à acumulação de espuma, o que se observou foi uma contínua formação de uma camada de espuma no decantador com uma taxa de acumulação reduzida, sem, aparentemente, ter se verificado grandes diferenças entre as fases. Portanto, talvez o efeito que se tenha conseguido nesse caso, seja o de melhoria das condições de mistura com o aumento da velocidade ascensional, em TDH ainda satisfatórios para o processo.

Todavia, é digna de nota, a operação do reator UASB citada por Santos (2003). Nela, apesar do TDH médio ser excessivamente alto (57 horas) e da velocidade ascensional média ser excessivamente baixa (0,07 m/h), uma volumosa camada de espuma se acumulou na superfície do separador trifásico do reator. Somente durante os recalques do esgoto afluente para o reator é que os dois referidos parâmetros atingiam valores considerados normais para

reatores UASB. A única explicação que pode ser aventada para tal ocorrência é a de uma provável baixíssima taxa de desprendimento de gás, provocada pela reduzida atividade do leito de lodo, o qual opera em uma carga biológica muito baixa. Aliado a esse fato, tem-se que a área de interface líquido-gás, para o desprendimento do biogás, é aparentemente excessiva.

Um outro parâmetro de grande importância na operação de reatores UASB é o tempo de retenção de sólidos (TRS). Por afetar a extensão de digestão de polímeros (proteínas, carboidratos, lipídeos) o TRS também afeta características físicas do lodo incluindo, provavelmente, a potencial capacidade de um certo lodo formar uma camada de espuma (HALALSHEH *et al.*, 2005). Em seus experimentos com reatores anaeróbios de mistura completa, Halalsheh *et al.* (2005) mediram, entre outras coisas, o potencial de formação de espuma (PFE) dos lodos mantidos em digestores operados com crescentes TRS. Uma inovadora proposta de medição da camada de espuma formada por flotação de lodo é descrita no trabalho. Seus resultados, a esse respeito, mostraram que o PFE decresceu quando o grau de digestão aumentou, devido ao aumento no TRS. Outra indicação foi que acréscimos na temperatura diminuíram o PFE.

Outras informações, retiradas da bibliografia, apontam para que excessos admitidos para determinados parâmetros operacionais podem ser causadores de formação e acumulação de espessas camadas de espuma. É o caso de elevada carga orgânica volumétrica (MAHMOUD *et al.*, 2003) e elevada carga biológica (HWU *et al.*, 1998a).

3.4.6 Coeficientes de acumulação e caracterização físico-química de espuma de reatores UASB

São poucos os trabalhos encontrados que se propuseram a fazer uma efetiva e razoavelmente padronizada medição da camada de espuma acumulada. Além disso, aqueles que o fizeram não se preocuparam com uma forma mais racional de expressar os valores dos coeficientes encontrados nem em comparar os seus com outros estudos que tenham também feito medições de camada de espuma.

Como a espuma se constitui de materiais sólidos particulados que o reator não reteve e que se acumulam próximos à superfície, com mais ou menos água em sua constituição, talvez, um melhor índice de caracterização quantitativa para esse subproduto seja algo do tipo: massa de sólidos totais ou de DQO de espuma por massa de DQO ou SST aplicados ao reator. A

expressão de um coeficiente de acúmulo por volume ou por espessura de espuma são interessantes, mas apresentam limitações para extrapolação porque são dependentes de outras variáveis (umidade, densidade).

Portanto, entendendo que a quantificação do coeficiente de acúmulo expresso por um parâmetro físico-químico é melhor, há que se medir tal parâmetro. No que concerne a essa questão, quase todos os estudos pesquisados se abstêm de medições de características físico-químicas do material constituído pela espuma. O único estudo conhecido que fez algumas análises físico-químicas sobre a espuma, não se preocupou em atrelá-las à medição quantitativa.

Nesse sentido, se expressam nas Tabela 3.1 e 3.2, respectivamente, a síntese da caracterização quantitativa e da caracterização físico-química, encontrada nos trabalhos pesquisados e referenciados ao longo dessa revisão de bibliografia.

Tabela 3.1 – Valores de coeficientes de acumulação de espuma para diversos estudos

| Local da espuma | Coeficiente de acumulação | | Referência |
|-----------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Decantador | 100 | ml/d | Versiani (2005) |
| Decantador | 4 a 8 | cm/cerca de 1 ano | Van Haandel e Lettinga (1994) |
| Separador | 0,22 | l/m ³ de esgoto | Santos (2003) |
| | 0,16 | l/kg DQO aplicada | |
| | 0,32 | l/kg SST aplicada | |
| Separador | 3 | cm/mês | Van Haandel e Lettinga (1994) |
| | 35 | cm/6meses | |
| Separador | 12,5 | cm/ano | Van Haandel e Lettinga (1994) |
| Separador | 63 | cm/cerca de 4 anos | Rocha (2002) |

Tabela 3.2 – Valores de características físico-químicas de espuma de reatores UASB

| Referência | Parâmetro (mg/l) | | | | | |
|-------------------|------------------|-------|-----|------------|-------|-------------|
| | DQO | ST | STV | Umidade(%) | OG | Surfactante |
| Versiani (2005)* | 14.280 | 318 | 124 | 21 | 4.300 | 190 |
| Versiani (2005)** | 14.980 | 1.000 | 784 | - | 94 | ND |

* Primeira amostragem do trabalho

** Segunda amostragem do trabalho

3.4.7 Aspectos microbiológicos de espuma em reatores UASB

Poucos dados têm sido publicados com relação à microbiologia da espuma formada em reatores UASB (Laubscher *et al.* 2001). Alguns potenciais problemas causados pela acumulação de espuma em reatores anaeróbios, notadamente reatores UASB, são conhecidos embora não se saiba ao certo o papel dos microrganismos em sua formação e acumulação. De fato, o que se sabe é que os agregados biológicos (grânulos ou flocos anaeróbios) podem subir para superfície do reator, motivados por efeito de flotação entre outros, e se acumular, eventualmente, constituindo uma camada biológica.

Pode se especular que, em reatores UASB abertos, a incidência de luz na câmara de decantação e a disponibilidade de nutrientes provenientes da digestão anaeróbia possibilitem que sobre a camada de espuma se desenvolvam algas e outros microrganismos fotossintetizantes, em adição àqueles provenientes do interior do reator. A proliferação de algas, em particular, pode contribuir para a formação de uma espuma compacta, tal como ocorre comumente em águas estancadas de lagos eutrofizados.

Por outro lado, a atividade fotossintetizante de microrganismos pode elevar o nível de oxigênio dissolvido na espuma, e assim favorecer o desenvolvimento de organismos aeróbios ou microaerofílicos, os quais poderiam representar um aspecto positivo para a degradação de produtos provenientes da digestão anaeróbia. Por exemplo, sob baixa concentração de oxigênio, o sulfeto proveniente da digestão anaeróbia poderia ser parcialmente oxidado a enxofre elementar pelos microrganismos oxidadores de sulfeto, diminuindo assim a concentração do sulfeto no efluente do reator.

A morfologia dos tipos microbianos pode ter grande importância na formação de uma espuma compacta. Além dos microrganismos filamentosos mencionados acima, bactérias de crescimento agregado (em mucilagem) teriam função estrutural na espuma sendo suporte para o desenvolvimento de outras espécies.

Acredita-se que uma diversa comunidade microbiana pode existir em espumas formadas em decantadores de reatores UASB abertos. É possível que esses microrganismos na superfície do reator tenham efeitos benéficos, tais como mineralizar a matéria orgânica e inorgânica presente na espuma ou mesmo contribuir para a minimização de maus odores. Na revisão da literatura não foram encontrados estudos de caracterização microbiológica da espuma gerada

em reatores UASB tratando esgotos domésticos, assim sendo, uma caracterização mesmo que somente morfológica da espuma forneceria informações relevantes quanto ao tipo de espuma que se forma em decantadores de reatores UASB e, ainda, sobre a interferência desses microrganismos na qualidade do efluente final.

3.5 Aspectos da biodegradação de materiais complexos

Segundo Batstone *et al.* (2000), águas residuárias complexas seriam aquelas que conteriam significantes níveis de gorduras, proteínas ou particulados. A seu turno, Zeeman e Sanders (2001) definem, ao mesmo tempo, resíduos complexos e águas residuárias complexas como substratos que contém uma larga fração de sólidos suspensos, os quais se dividiriam em carboidratos, proteínas e lipídios. Esta última referência ainda acrescenta que a diferença entre água residuária e resíduo complexo é a concentração de sólidos totais (ST) e conseqüentemente a concentração de DQO total.

A espuma de reatores de tratamento, especialmente a acumulada em reatores UASB, é virtualmente um resíduo ou água residuária complexa. Isto porque, segundo o conceito que está emergindo desta revisão, a espuma seria constituída por materiais particulados, heterogêneos, provindos do afluente ou gerados no próprio processo de tratamento. Portanto, a hipótese a ser testada é a de que a espuma é uma camada predominantemente constituída de compostos orgânicos e, assim sendo, passível de biodegradação. A qualificação de espuma como água residuária ou resíduo complexo, dependerá do quanto de água vier conjuntamente com a espuma quando da sua retirada.

Em se pensando sobre a tecnologia de tratamento do material complexo espuma, os processos biológicos possíveis são, em geral, os aeróbios e os anaeróbios. Nesse sentido, as informações de Batstone *et al.* (2000) e Vidal *et al.* (2000) são de que a tecnologia por processos anaeróbios se situa mais atrativa economicamente em comparação com a tecnologia aeróbia para tratamento de águas residuárias complexas, embora aquela esteja ainda subutilizada. Em adição, apesar de parecer que os processos aeróbios são sempre mais eficientes do que os anaeróbios na remoção da carga orgânica de águas residuárias, uma experiência relatada por Garcia-Encina *et al.* (2004) concluiu que a biodegradabilidade anaeróbia de um resíduo predominantemente gorduroso e graxoso foi maior do que a aeróbia, indicando o tratamento anaeróbio mais aplicável e eficiente.

Dessa forma, hipotetiza-se que a biodegradação anaeróbia para a espuma seja mais vantajosa do que a aeróbia, como função da potencial geração de metano no biogás ou da virtual maior eficiência de tratamento. Tendo isso em conta, na seqüência, levantam-se possíveis dificuldades de biodegradação de compostos complexos, sobretudo da anaeróbia, relacionadas com a não aclimação prévia do lodo biológico ao substrato e inibição do lodo por efeito de excessos de carboidratos, proteínas ou, especialmente, lipídios.

Segundo Vidal *et al.* (2000), a taxa de hidrólise de uma proteína comum no leite é dependente da aclimação da biomassa. Tal afirmativa é baseada em alguns estudos experimentais avaliados, os quais mostraram que, em condições anaeróbias, a taxa de produção de metano a partir da caseína foi maior em lodo aclimatado do que no lodo não aclimatado. Inclusive, para este uma fase lag – de aclimação – considerável foi observada. Por sua vez, em seus experimentos com biodegradabilidade de gorduras e graxas em batelada, Garcia-Encina *et al.* (2004) preocuparam-se em, também, expor tanto o lodo anaeróbio quanto o aeróbio ao prévio contato com o substrato para que a fase lag fosse superada.

A biodegradação anaeróbia de carboidratos é em geral rápida, tanto na etapa de hidrólise, quanto na de acidificação, a qual conduz à formação de produtos intermediários como propionato, butirato e acetato, isto é, os ácidos graxos voláteis (AGV). Uma acumulação desses intermediários do processo, principalmente na forma não dissociada, conduz à inibição de várias espécies de microrganismos com o conseqüente decréscimo na produção de metano (AGUILAR, 1995, citado por VIDAL *et al.*, 2000) devido a questões de ordem cinética e termodinâmica (AQUINO e CHERNICHARO, 2005).

Vidal *et al.* (2000), em seus experimentos em batelada, verificaram que para as altas concentrações de DQO (5 – 20 g/l) no substrato, o qual era constituído essencialmente por carboidratos e proteínas, houve acúmulo de AGV e diminuição na biodegradabilidade e, principalmente, na metanização (geração de metano) da DQO inicial. Com relação ao efeito das proteínas, Vidal *et al.* (2000) aventam para um possível efeito tóxico da amônia (nitrogênio amoniacal não ionizado) sobre os microrganismos metanogênicos. Sendo que a amônia é formada, em degradação anaeróbia, como resultado da biodecomposição de proteínas a AGV.

Talvez os lipídeos sejam os compostos de mais difícil degradação biológica e, portanto, potencialmente causadores de problemas nos processos de tratamento. Segundo Zeeman e

Sanders (2001), dentre os lipídeos, os triglicérides são hidrolisados a ácidos graxos de cadeia longa (AGCL) e posteriormente oxidados, pela via denominada “ β oxidação”, aos intermediários acetato ou propionato. A seu turno, Mendes e Castro (2005) informam que a hidrólise de lipídeos torna-se uma etapa limitante na digestão anaeróbia influenciada pelo requisito de reduzidas concentrações de hidrogênio gás (H_2) para degradação dos AGCL. Nesse sentido, a subsequente etapa de metanogênese hidrogenotrófica, isto é, formação de metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono, pode ter um papel decisivo no consumo do excesso de H_2 .

Ao encontro com tal contexto está a proposição de que, diferentemente da hidrólise de proteínas e carboidratos, a hidrólise de lipídeos dificilmente ocorre em ausência de metanogênese (MIRON *et al.*, 2000). Por fim, tem sido encontrado que concentrações em níveis milimolares de AGCL já seriam inibitórias para microrganismos anaeróbios (KOSTER e CRAMER, 1987; HWU *et al.*, 1996, citados por HWU *et al.*, 1998a).

Uma possível solução para o tratamento de materiais complexos, especialmente aqueles que apresentem elevadas concentrações de lipídeos, é a aplicação prévia de enzimas hidrolíticas específicas, tais como as lipases. Segundo Mendes e Castro (2005) o emprego dessa técnica permite redução dos níveis de sólidos suspensos, lipídeos e proteínas, o que possibilita melhores condições de operação no tratamento anaeróbio.

Finalizando, há que se refletir se a espuma de reatores UASB, em sendo constituída de materiais biodegradáveis aeróbia ou anaerobiamente, é melhor tratável na condição de resíduo ou na condição de água residuária. Na condição de resíduo, talvez um digestor próprio fosse a melhor prescrição. Por sua vez, na condição de água residuária, um tratamento conjunto com o esgoto afluyente ao reator UASB, eventualmente, seria uma boa alternativa. Entretanto, segundo Zeeman e Sanders (2001), a diluição torna mais complexo o tratamento subsequente e frequentemente impede o reuso de energia e nutrientes.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Introdução

Tendo-se em vista os objetivos específicos firmados e algumas hipóteses desenvolvidas na revisão de bibliografia, os materiais e métodos necessários para a consecução do pretendido foram planejados e executados. Parte dos trabalhos se deu em campo, coleta de amostras e quantificação da acumulação de espuma, e parte em laboratório, análises de caracterização físico-química, de biodegradação e microbiológica.

Houve dificuldades no transcurso do trabalho experimental, em função do caráter explorador do estudo. Nenhuma outra pesquisa similar havia sido realizada, sobretudo no tocante à caracterização qualitativa da espuma de reatores UASB, que pudessem balizar os experimentos a serem desenvolvidos. Todavia, com o desenrolar dos trabalhos as arestas metodológicas foram sendo diminuídas e uma padronização foi conseguida. Assim, são relatados na seqüência os materiais e os métodos utilizados, especialmente aqueles resultantes do esforço de padronização.

4.2 Aparato experimental e fases operacionais

O trabalho experimental de campo foi desenvolvido na ETE Experimental UFMG/COPASA, localizada na ETE Arrudas, pertencente à COPASA (Companhia de Saneamento de Minas Gerais). Nesse lugar foram instalados dois novos reatores UASB idênticos e geminados, de estrutura metálica, em escala de demonstração, mostrados na Figura 4.1. Eles serviram de suporte para esta pesquisa e ainda subsidiam outras dentro do Programa de Pós-Graduação SMARH da UFMG e do PROSAB edital 4 tema 2.

O sistema experimental, contemplando unidades de bombeamento, tubulações e reatores propriamente ditos, foi projetado para possibilitar a flexibilidade da variação da vazão afluente, da altura útil e da seção transversal dos reatores, sendo esta última modificação possibilitada por meio da introdução de stop-logs. Conseqüentemente, uma série de parâmetros operacionais variou, sendo que 4 fases operacionais foram definidas, cada qual com parâmetros constantes estabelecidos, mostrados na Tabela 4.1 para os reatores R1 e R2.

Uma unidade de peneiramento forçado também foi implantada de forma a permitir a alimentação de um dos reatores com o esgoto bruto previamente peneirado, esta sendo a única diferença entre

os dois reatores para uma mesma fase operacional. O peneiramento do esgoto é feito por meio de uma peça semelhante a um crivo, em forma cilíndrica, com ranhuras espaçadas de 1 mm, instalada numa conexão flangeada na linha de alimentação do reator. Portanto, R1 é o reator alimentado com esgoto bruto sem peneiramento forçado e R2 é aquele que recebe o esgoto previamente peneirado. A peneira que compõe a unidade de peneiramento forçado do R2 é apresentada na Figura 4.3, totalmente limpa.

Tabela 4.1 – Condições de operação dos reatores UASB estudados (fases operacionais)

| Parâmetros | UASB R1 e R2 | | | | UASB R3 |
|---------------------------|--------------|--------------------|---------------------|-------------|------------|
| | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 | Fase 4 | |
| Altura útil (m) | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 4,5 | 4,5 |
| Vazão (m ³ /d) | 36,8 | 52,5 | 80,9 | 27,0 | 36,6 |
| TDH (h) | 9,0 | 7,0 | 5,0 | 9,0 | 9,3 |
| V _{asc} (m/h) | 0,50 | 0,71 | 1,10 | 0,50 | 0,48 |
| AITD (m ²) | 3,1 | 3,1 | 3,1 | 2,2 | 1,0 |
| Duração da operação (d) | 62 | 60 | 51 | 63 | 238 |
| Meses/ano | nov,dez/04 | jan, fev,mar/05 | abr, mai, jun/05 | ago, set/05 | jan–set/05 |

TDH: tempo de detenção hidráulica

V_{asc}: velocidade ascensional

AITD: área de influência dos tubos distribuidores

Paralelamente ao aparato dos reatores UASB R1 e R2 descrito, um outro, existente a mais tempo na ETE experimental, foi explorado. Tal sistema possibilita a operação de um terceiro reator UASB (Figura 4.2), nomeado como R3, totalmente construído em ferrocimento. Esse reator, para todo o período experimental, funcionou com parâmetros aproximadamente constantes, os quais também são descritos na Tabela 4.1, em sua última coluna.

Importa ressaltar que todos os reatores UASB, R1, R2 e R3, apresentavam suas saídas efluentes submersas na unidade de decantação. Portanto, a retenção de espuma ocorreria naturalmente na superfície do decantador. Além disso, inexistiam coberturas para os decantadores, o que permitia um livre acesso a qualquer parte dessa superfície com uma haste um pouco mais extensa. Por sua vez, o interior do separador trifásico, em todos os reatores, era totalmente fechado ao acesso, sendo as únicas comunicações externas feitas por meio de tubulação de biogás e/ou tubulação de descarte da espuma.



Figura 4.1 – Vista dos reatores UASB R1 e R2 antes da fase 1



Figura 4.2 – Vista do reator UASB R3 existente na ETE experimental



Figura 4.3 – Vista da peneira componente da unidade de peneiramento

4.3 Avaliação da acumulação da espuma nos reatores UASB

4.3.1 Medição da espuma acumulada no decantador dos reatores R1 e R2

A acumulação de espuma no decantador dos reatores UASB foi avaliada retirando-se todo o material flutuante, acumulado superficialmente, com utilização de uma peneira de limpeza de piscina e medindo-se o volume com o auxílio de baldes graduados. Após a introdução e retirada da peneira na região superficial do decantador, esperava-se que o excesso de água que vinha com a espuma escoasse pelos furos da peneira. A Figura 4.4 mostra, de forma ilustrativa, um corte dos reatores geminados e a espuma acumulada na superfície dos decantadores como função da saída do efluente afogada.

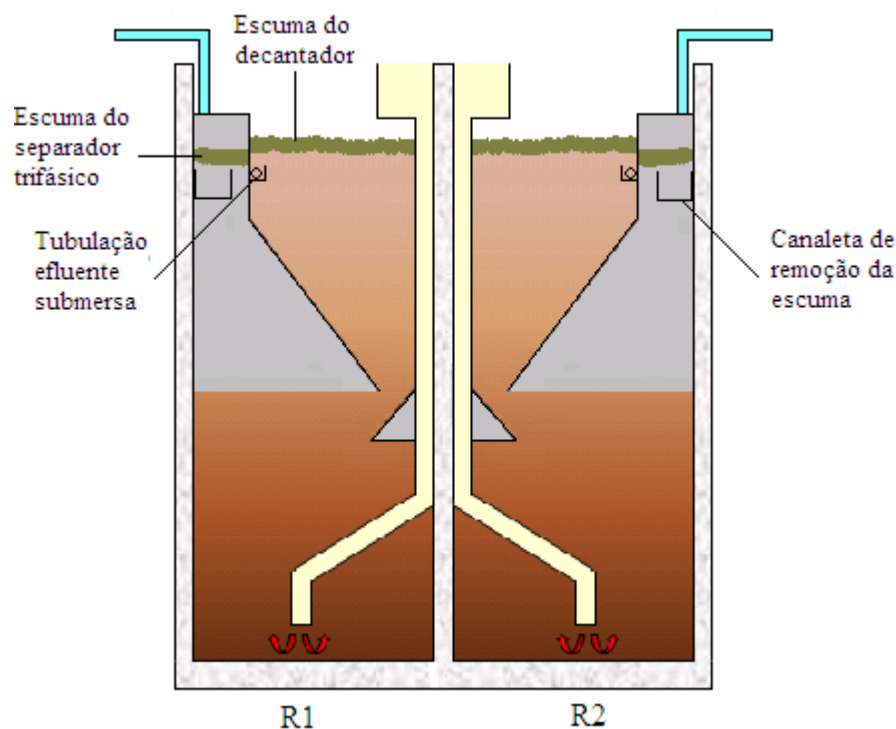


Figura 4.4 – Corte esquemático do reatores UASB geminados R1 e R2 e visualização das escumas acumuladas

A frequência dessa medição foi aproximadamente quinzenal. Como se percebeu um acúmulo excessivo de espuma dentro da periodicidade de quinze dias, particularmente para a fase 3, um menor intervalo de dias entre retiradas foi aplicado a fim de não tornar o trabalho inviável por via manual. Algumas dessas retiradas não geraram amostras para processamento em laboratório em função da própria menor periodicidade.

4.3.2 Medição da espuma acumulada no interior do separador trifásico dos reatores R1 e R2

A acumulação da espuma no interior do separador trifásico foi medida também por meio de baldes graduados, porém sem a necessidade e a possibilidade de retirada manual da espuma acumulada. A Figura 4.4, em perfil esquemático, mostra também a espuma acumulada no interior do separador trifásico. Na mesma figura, visualiza-se, em um nível mais inferior em relação a essa espuma, uma canaleta em forma de “u” para saída do material acumulado. Essa canaleta, dotada de uma ligeira inclinação, interligava-se, na sua extremidade, a uma tubulação, a qual deveria conduzir a espuma até o exterior, com terminação na base do reator.

Particularmente para fase 1 do experimento, não foi tentado nenhum procedimento de retirada da espuma acumulada no separador, na medida em que vazamentos de biogás impediam que se controlasse, por meio de selo hídrico externo, o nível da superfície líquida no seu interior. Esse controle do nível da superfície líquida, por meio da pressão gasosa transferida pela altura da coluna de água presente no selo hídrico, foi considerado a chave do processo de retirada.

Portanto, o procedimento de retirada da espuma acumulada no interior do separador trifásico envolveu, como uma primeira tentativa, desenvolvida na segunda fase experimental, a pressurização adicional da câmara gasosa com o próprio biogás produzido pelo reator. A transferência de uma pressão adequada foi manobrada por meio da elevação da coluna líquida de um selo hídrico acoplado a cada reator. Com a pressurização, em tese, o nível líquido interno decresceria e parte da camada de espuma que sobrenada ficaria retida na calha, a qual permitiria o escoamento do material quando da abertura do registro correspondente.

Como tal procedimento não obteve evidente sucesso, nas fases 2 e 3, uma outra alternativa foi adotada na quarta fase. Para esta, o nível normal de operação do líquido no interior do separador foi mantido abaixo da calha de expulsão da espuma, o que demandou, portanto, alteração (redução) no nível estático do líquido da unidade de decantação. Assim, o procedimento não mais envolveu pressurização, mas uma despressurização da câmara interna do separador trifásico, no momento da abertura do registro, para permitir a elevação da camada de espuma ao nível da calha de expulsão.

A periodicidade das retiradas da espuma do separador dependeu da necessidade, em função de um acúmulo excessivo de material no interior do separador. Como, em geral, não se percebeu grande necessidade ao longo da fase, pelo menos no fim da fase o procedimento de retirada escolhido foi desenvolvido.

4.3.3 Acompanhamento da evolução da acumulação da espuma no decantador do reator UASB R3 em tempo prolongado

Para o reator UASB R3 não foram realizados procedimentos de retirada de toda espuma acumulada durante um período determinado. O que se fez foi, a cada dois meses, aproximadamente, medir a quantidade de espuma presente no decantador do reator, relativa a uma porção de um quarto da área superficial deste. Procedia-se essa medição com os mesmos recursos usados nas medições dos reatores R1 e R2, isto é, com peneira de piscina e balde

graduado. Após a medição do volume, não se retornava a espuma para o reator, mas sim a descartava, em seguida à amostragem. Procurou-se variar o quarto de retirada a fim de se evitar vícios.

Fez-se a consideração de que, partindo de uma distribuição superficialmente homogênea da camada de espuma no decantador, a quantidade volumétrica total de espuma existente seria simplesmente quatro vezes o volume retirado no quarto em questão. Assim, por diferença obteve-se a acumulação volumétrica para os vários intervalos entre medições. A Figura 4.5 e as Equação 4.1 e 4.2, tornam mais claros os procedimentos e cálculos efetuados nessa proposta de investigação.

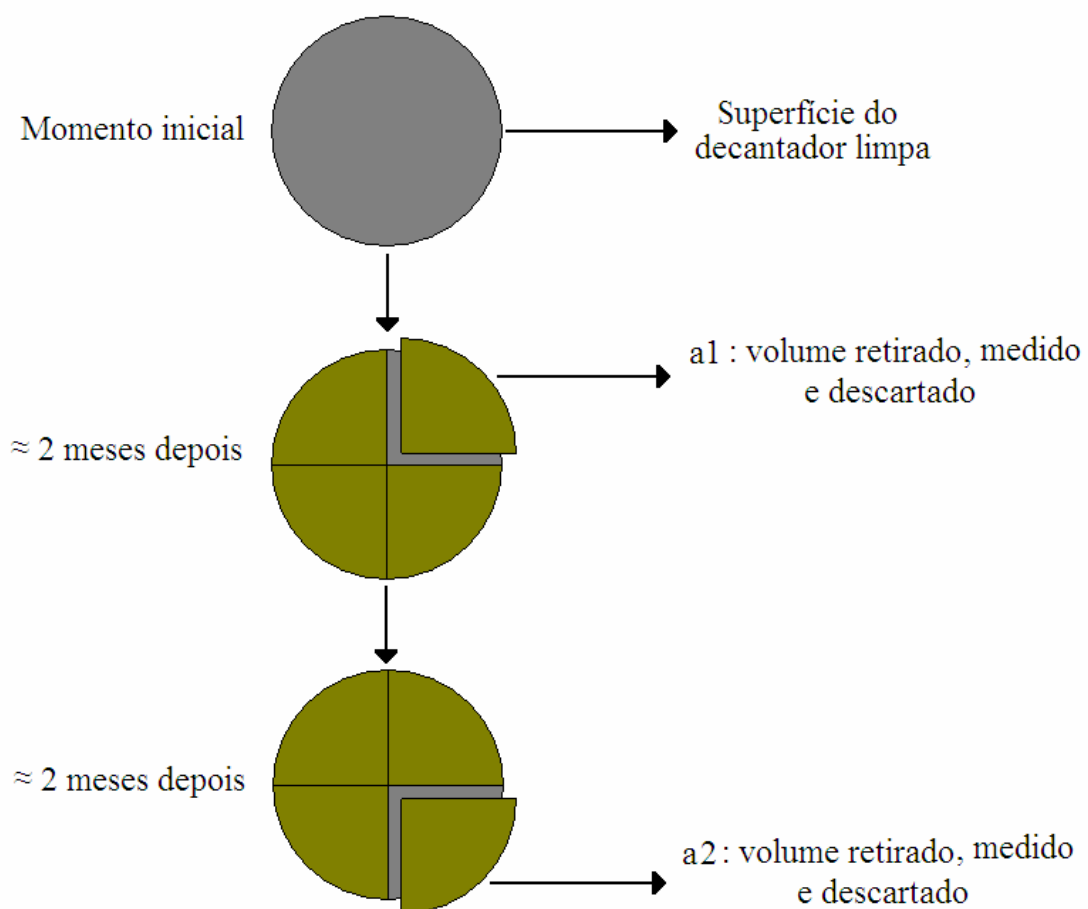


Figura 4.5 – Esquema de medição da espuma acumulada no decantador do reator R3, sem retirada total

$$A1 = 4 \times a1 \quad (4.1)$$

Na qual:

A1 = volume acumulado no 1º período (l)

a1 = volume retirado, medido e descartado no 1º período (l)

$$A2 = 4 \times a2 - (A1 - a1) \quad (4.2)$$

Na qual:

A2 = volume acumulado no 2º período (l)

a2 = volume retirado, medido e descartado no 2º período (l)

4.4 Avaliação de parâmetros qualitativos da espuma nos reatores UASB

4.4.1 Amostragem e preparo das amostras para procedimentos analíticos

Quando da retirada da espuma para a quantificação do volume acumulado, uma alíquota foi sempre tomada como amostra de modo a possibilitar a realização de análises laboratoriais de natureza físico-química e, em determinadas vezes, também de fração biodegradada. Entretanto, antes de se proceder efetivamente às análises das amostras de espuma, elas foram preparadas por meio de processamento em moinho de bolas por 15 min. a 250 rpm, a fim de homogeneizá-las ao máximo e desconstituir a intrincada estrutura original.

A Figura 4.6 mostra uma foto do moinho de bolas da marca Fritsch, modelo Planetary Ball Mill Pulverisette 5, usado no processamento das amostras. Se, por algum motivo, após o processo de homogeneização, ainda restasse um pouco de material visivelmente heterogêneo (ex. emaranhado de cabelo), estes eram descartados. A Figura 4.7 revela o tipo de amostra que, em geral, se conseguia com o preparado das amostras *in natura*. Por sua vez, a Figura 4.8 mostra o fluxograma representativo dos procedimentos de amostragem e preparo das amostras antes de serem submetidas às análises diversas.



Figura 4.6 – Foto do moinho de bolas e acessórios usados no preparo das amostras



Figura 4.7 – Foto de um recipiente contendo uma amostra de espuma resultante do preparo

4.4.2 Procedimentos analíticos físico-químicos

Os parâmetros qualitativos físico-químicos da espuma, aferidos com a mesma frequência da medição quantitativa para as amostras dos reatores R1 e R2, foram: DBO, DQO, ST e STV, seguindo as orientações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (AWWA/APHA/WEF, 1998).

Além dessas, análises de matéria orgânica específica, isto é, de carboidratos, proteínas e lipídeos, foram desenvolvidas sobre as amostras de acordo com as metodologias propostas por Blundi e Gadêlha (2001), relativas a análises sobre águas residuárias. A periodicidade dessas análises não acompanhou à das outras análises, sendo assim, procedimentos mais espaçados.

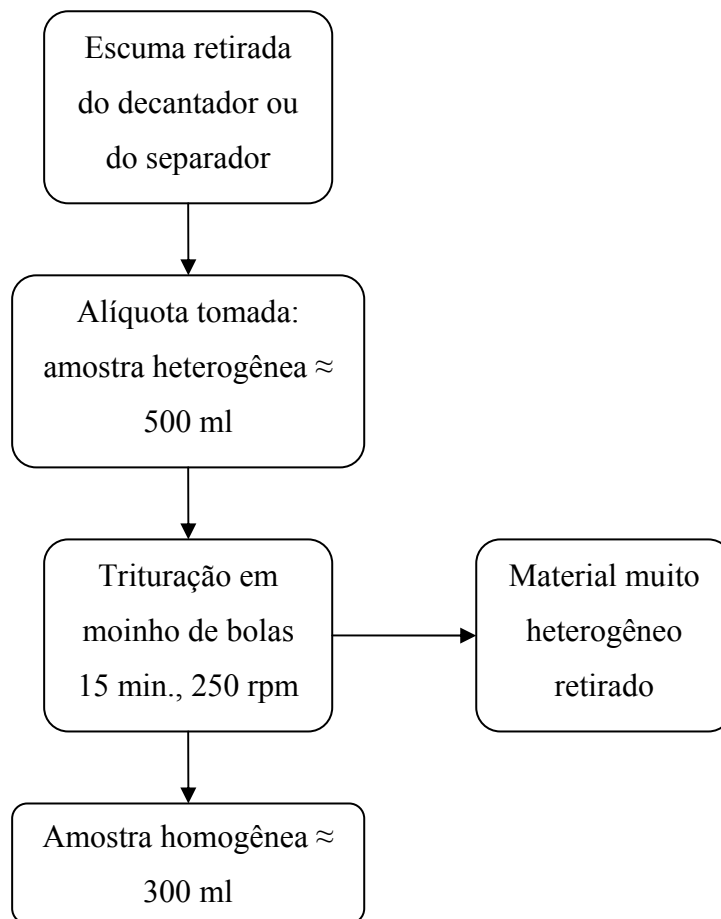


Figura 4.8 – Fluxograma dos procedimentos de amostragem e preparo das amostras de espuma para análise

A Figura 4.9 se constitui em um fluxograma que mostra todas variações de análises de natureza físico-química e, também, de biodegradação cumpridas sobre as amostras preparadas de espuma. Para as amostras de espuma do reator UASB R3, as mesmas análises foram realizadas, quando da sua retirada. Todas essas análises tiveram desenvolvimento em laboratórios do DESA (Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental)/UFMG.

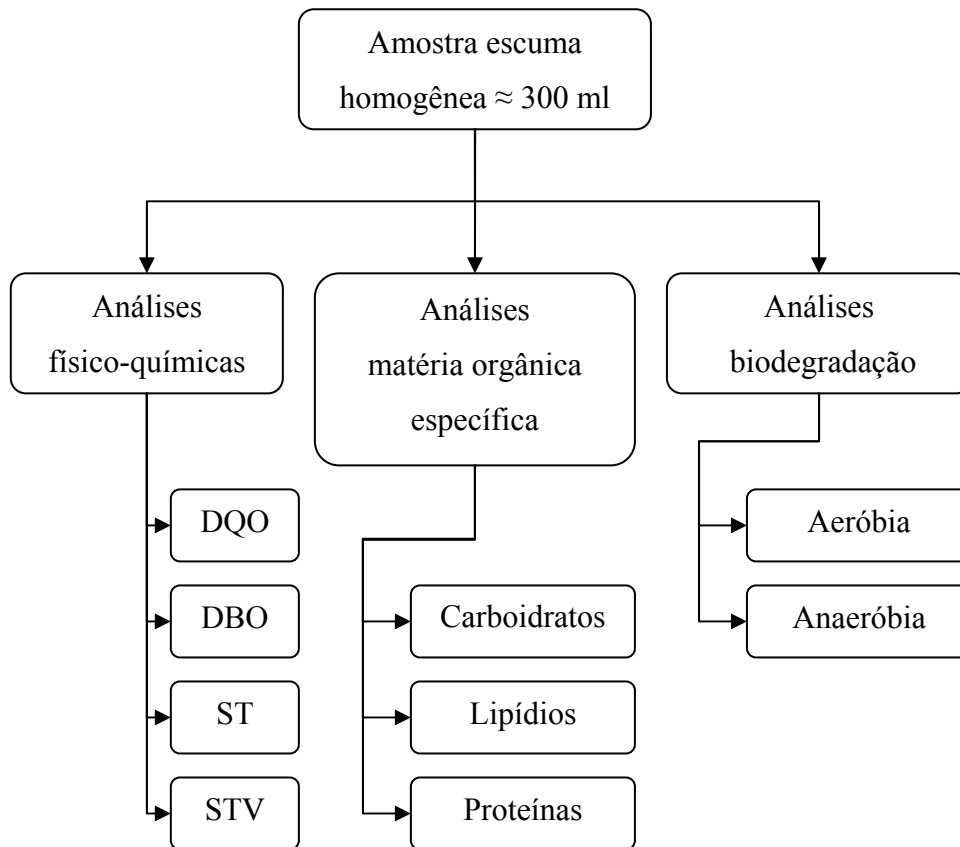


Figura 4.9 – Fluxograma das análises de caracterização qualitativas (físico-química e biodegradação) feitas sobre as amostras de espumas

4.4.3 Testes de fração biodegradada da espuma

4.4.3.1 Testes de fração biodegradada aerobiamente

Os testes de fração biodegradada aerobiamente realizados com a espuma dos reatores UASB R1, R2 e R3 foram desenvolvidos utilizando-se o aparato normal para o teste de DBO a 20° C. De fato, o que se fez foi determinar a DBO de 5 dias, aproveitada da caracterização físico-química, e a DBO de 20 dias, seguindo-se a referência metodológica, já mencionada anteriormente, para esse tipo de análise.

Com isso, determinou-se a fração biodegradada aerobiamente no curto prazo e no longo prazo, a partir, respectivamente, da DBO₅ e da DBO₂₀, tendo-se também a DQO total da amostra da espuma correspondente. As fórmulas usadas nos cálculos estão expressas nas Equações 4.3 e 4.4.

Não foi necessário inocular biomassa aeróbia, haja vista que a própria espuma demonstrou conter quantidade suficiente de microrganismos aeróbios para metabolizar o substrato e causar substancial depleção de oxigênio dissolvido. Alguns testes preliminares com inoculação de biomassa aeróbia, resultaram em depleção rápida do oxigênio dissolvido antes dos 5 dias, o que demandava elevadas diluições, por isso o procedimento de inoculação não foi adotado.

Buscou-se realizar pelo menos um teste por fase operacional dos reatores UASB R1 e R2, em geral no final da fase, para a espuma do decantador. Testes foram implementados para a espuma do separador dos reatores R1 e R2, quando da sua retirada, assim como para a espuma do decantador do reator UASB R3.

$$BIOD. AER. curto prazo = \frac{DBO_5}{DQO} \times 100\% \quad (4.3)$$

Na qual:

BIOD. AER. curto prazo = percentagem da fração biodegradada aerobiamente no curto prazo, 5 dias (%)

DBO_5 = DBO da amostra a 5 dias de incubação (mg/l)

DQO = DQO imediata da amostra (mg/l)

$$BIOD. AER. longo prazo = \frac{DBO_{20}}{DQO} \times 100\% \quad (4.4)$$

Na qual:

BIOD. AER. longo prazo = percentagem da fração biodegradada aerobiamente no longo prazo, 20 dias (%)

DBO_{20} = DBO da amostra a 20 dias de incubação (mg/l)

DQO = DQO imediata da amostra (mg/l)

4.4.3.2 Testes de fração biodegradada anaerobiamente

Os testes de fração biodegradada anaerobiamente foram desenvolvidos a partir de uma adaptação do teste de BMP (*Biochemical Methane Potential*) originalmente proposto por Owen *et al.* (1979). Nos testes utilizaram-se frascos de antibiótico, de 110 ml devidamente tampados com septo de borracha e lacrados com anel de alumínio, para a incubação das amostras em duplicata e seringas esmerilhadas de vidro para a medição da produção do

biogás, sendo a análise do percentual de metano feita por cromatografia gasosa. A periodicidade dos testes acompanhou a mesma dos testes aeróbios.

A concentração de metano no biogás foi aferida em cromatógrafo Perkin-Elmer Autosystem XL, equipado com detector de condutividade térmica, utilizando coluna empacotada e hélio como gás de arraste. As temperaturas do forno e do detector foram de 60 °C e 150 °C, respectivamente.

Portanto, para cada teste desenvolvido, os frascos de 110 ml, mostrados na Figura 4.10, foram preenchidos com o lodo anaeróbio, solução tampão e de nutrientes, e os substratos teste, isto é, as amostras de espuma preparadas. O lodo anaeróbio utilizado foi retirado do próprio reator UASB R1, das duas torneiras de amostragem de lodo mais inferiores, sempre a um ou dois dias antes do teste, e preservado em geladeira a 4° C. A solução de diluição contendo os compostos com valor tamponante e nutritivo foi preparada em laboratório para gerar as concentrações informadas segundo a Tabela 4.2. Adicionalmente, dissolveram-se 4 gramas de bicarbonato de sódio (NaHCO₃) por litro de solução de diluição, como suprimento de alcalinidade, e um pouco de resarsurina como indicador de presença de oxigênio. De uma solução diluída de 10% de resarsurina, adicionou-se 1 ml por litro de solução.

Tabela 4.2 – Concentrações dos nutrientes componentes da solução de diluição usada nos testes de fração biodegradada anaerobiamente

| Macronutrientes e tamponantes | | Micronutrientes | |
|--------------------------------------|---------------------|--|---------------------|
| Substância | Concentração (mg/l) | Substância | Concentração (mg/l) |
| K ₂ HPO ₄ | 150 | FeCl ₃ .6H ₂ O | 2 |
| KH ₂ PO ₄ | 650 | ZnCl ₂ | 0,05 |
| NH ₄ Cl | 500 | CuCl ₂ .2H ₂ O | 0,03 |
| Na ₂ S.9H ₂ O | 50 | MnCl ₂ .4H ₂ O | 0,50 |
| CaCl ₂ .2H ₂ O | 100 | (NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ .4H ₂ O | 0,05 |
| MgCl ₂ .6H ₂ O | 100 | AlCl ₃ .6H ₂ O | 0,05 |
| | | CoCl ₂ .6H ₂ O | 2 |
| | | NiCl ₂ .6H ₂ O | 0,05 |
| | | H ₃ BO ₃ | 0,01 |

Para os frascos de 110 ml adotou-se como volume final da fase líquida, 55 ml ou 50 % da capacidade. Importa ainda relatar que se padronizou como concentrações de referência no volume final dos frascos: 4,5 g/l de STV para o lodo de inóculo e 2,0 g/l de DQO supostamente biodegradável para o substrato teste. Para isso, arbitrou-se que 70% da DQO total da amostra era biodegradável.

Em alguns frascos a espuma foi substituída por substratos de fácil biodegradação, por exemplo glicose, com a finalidade de se avaliar a atividade do lodo. Esses eram os frascos “controle”. Em outros, por sua vez, em lugar da espuma se colocava um adicional da solução de diluição para se avaliar a produção intrínseca de metano do lodo. Esses últimos são denominados de frascos “branco”, e os seus resultados foram efetivamente usados nos cálculos de fração biodegradada, como desconto.

O controle da temperatura da incubação em 30 ± 2 °C e da agitação orbital contínua em 210 ± 5 rpm, para os frascos incubados, foi feito por meio de uma incubadora shaker da marca Marconi® e modelo MA 420 A mesma é mostrada na Figura 4.11.



Figura 4.10 – Frascos de antibiótico de 110 ml incubados a 30°C e com rotação orbital de 210 rpm



Figura 4.11 – Incubadora shaker usada nos testes de fração biodegradada anaerobiamente

Da mesma forma que no teste aeróbio, o valor da fração biodegradada anaerobiamente foi determinada após incubação por 5 dias e 20 dias. Para tanto, a produção líquida média de metano a partir de cada duplicata foi calculada com base no volume de biogás medido com as seringas esmerilhadas, no resultado da cromatografia gasosa e no balanço de massa para o espaço gasoso dos frascos de reação.

A conversão total potencial da matéria orgânica a volume de metano foi estimada por meio do valor de DQO da amostra adicionada em cada frasco de incubação, e sabendo-se que, a 30° C e 1 atm, 1 g de DQO convertida equivale a 388,5 ml de metano no biogás.

O resultado final das frações biodegradadas anaerobiamente no curto prazo (5 dias) e no longo prazo (20 dias) foi calculado por meio da fórmula expressa na Equação 4.5.

$$BIOD. ANAER. \text{ curto/longo prazo} = \frac{(V_{CH_4} \text{ amostra} - V_{CH_4} \text{ branco})}{V_{CH_4} \text{ potencial escuma}} \times 100\% \quad (4.5)$$

Na qual:

BIOD. ANAER. curto/longo prazo = percentagem da fração biodegradada anaerobiamente (%) no longo ou no curto prazo, 5 ou 20 dias de incubação

V_{CH_4} amostra = volume (ml) de metano da amostra obtido da medição do biogás e sua análise

V_{CH_4} branco = volume (ml) de metano do branco obtido da medição do biogás e sua análise

V_{CH_4} potencial da escuma = volume (ml) de metano resultante da conversão total da DQO da amostra em metano

4.5 Caracterização cromatográfica da escuma

4.5.1 Introdução

A cromatografia é uma técnica química de separação de substâncias que se baseia na interação diferencial dos compostos presentes em uma mistura entre uma fase estacionária (coluna cromatográfica) e a fase móvel (solvente ou gás de arraste). A função da fase móvel é arrastar os compostos presentes na mistura pela coluna cromatográfica, onde se dá efetivamente a separação. A interação diferenciada dos componentes da mistura e da fase estacionária da coluna cromatográfica fazem com que os compostos presentes sejam eluídos (saíam da coluna) em tempos diferentes, ou seja, separados. Os compostos separados são então encaminhados para um detector onde são apropriadamente detectados e/ou quantificados. Os dois principais tipos de cromatografia são aqueles que empregam um líquido (cromatografia líquida) ou um gás (cromatografia gasosa) como fase móvel.

Nesse estudo, apenas a cromatografia gasosa foi utilizada. Para ser separado por cromatografia gasosa, um composto deve ser carregado pelo gás de arraste (fase móvel) durante a corrida cromatográfica. Dessa forma, a técnica se aplica a compostos voláteis e semi-voláteis, ou seja, de baixo ponto de ebulição. Em geral, a técnica consegue separar com sucesso compostos que tenham ponto de ebulição menor que 300 °C e que sejam termoestáveis, ou seja, que não sofram decomposição nessas temperaturas. Dessa forma, a técnica de cromatografia gasosa pode ser aplicada à detecção e quantificação de compostos orgânicos

pequenos e apolares, ou seja, de baixo ponto de ebulição, presentes em amostras de esgoto sanitário, efluentes biológicos e espuma.

4.5.2 Preparo da amostra

Para extração dos compostos orgânicos da espuma e posterior análise cromatográfica, utilizou-se a técnica de extração líquido-líquida. Nessa técnica, solventes apolares e imiscíveis na água (Ex. hexano, acetato de etila e éter metil ter-butilico-MTBE) são misturados com a amostra aquosa, de forma a extrair da fase aquosa os compostos orgânicos presentes. Só serão extraídos os compostos orgânicos mais apolares, que tem mais afinidade pelos solventes (hexano e acetato de etila) do que pela água. Ensaios preliminares mostraram que o acetato de etila foi mais eficiente para a extração de orgânicos presentes na camada de espuma, e, por isso, somente essa metodologia é apresentada.

Inicialmente, o pH da fase aquosa foi ajustado para o valor $\text{pH} = 7$, e a fase aquosa foi então transferida para o funil de separação onde se adicionou 100 g de NaCl e 50 ml de acetato de etila. A função do NaCl é ajudar a separação das fases aquosa e orgânica (acetato de etila), evitando assim a formação de emulsão. A mistura foi agitada por 1 minuto e depois deixada em repouso para a total separação das fases, e caso necessário, a emulsão foi ‘quebrada’ utilizando banho de ultrassom. A fase aquosa foi coletada em um béquer de 1 litro, enquanto a fase orgânica foi transferida para um béquer de 100 ml. A operação foi repetida com outros 50 ml de acetato de etila puro, coletando-se a fase orgânica no mesmo béquer de 100 ml. Ao final o béquer contendo a fração orgânica foi tampado com papel alumínio e deixada a temperatura ambiente e dentro de capela para evaporação total do solvente. A matéria seca foi então resuspendida em 2 ml de acetato de etila e transferida para frascos de cromatografia que foram guardados em congelador até a análise cromatográfica.

4.5.3 Método cromatográfico

Vários métodos cromatográficos, isto é, condições de operação do cromatógrafo, foram testados, e o método que resultou em melhor separação dos compostos orgânicos extraídos das amostras de espuma é detalhado abaixo. Utilizou-se um cromatógrafo a gás da Perkin Elmer (Autosystem XA) equipado com amostrador automático, forno e detector de ionização de chama.

O início da corrida cromatográfica se deu com o forno do cromatógrafo a 110 °C, e a temperatura permaneceu nesse valor por 10 min para permitir a saída da coluna de todo o solvente (acetato de etila). Então a temperatura foi aumentada até 300 °C na taxa de 5 °C /minuto, e finalmente a temperatura foi mantida a 300 °C por mais 32 minutos. Dessa forma, o tempo da corrida cromatográfica totalizou 80 minutos. A temperatura do detector foi de 350 °C. Utilizou-se uma coluna da Perkin Elmer (PE-PONA) que, por ser apolar, permite a separação de compostos hidrofóbicos.

O gás de arraste usado foi Nitrogênio (N₂) ultra-puro, e a pressão do gás através da coluna cromatográfica era mantida em 44 psi. A temperatura do injetor foi mantida a 300 °C, dessa forma os compostos com alto ponto de ebulição, como as proteínas e outros biopolímeros não seriam volatilizados. Compostos não volatilizados não são obviamente arrastados pelo N₂ para a coluna, não sendo, portanto detectados.

4.6 Caracterização microbiológica da espuma

A amostragem da camada de espuma para a qualificação microbiológica foi realizada à parte das demais. Apenas quantidades reduzidas foram retiradas.

A espuma coletada, somente nos decantadores dos reatores UASB R1, R2 e R3, foi acondicionada em recipientes fechados e encaminhada ao laboratório para análise imediata. As amostras foram levemente homogeneizadas com água destilada e submetidas a análises microscópicas de campo claro e de contraste de fase em um Microscópio Olympus BX50. Quando possível, se preservou a integridade da camada de espuma coletada para se avaliar separadamente extratos mais superficiais e os mais interiores.

4.7 Análises físico-químicas dos afluentes e efluentes aos reatores UASB

Em paralelo a todas as análises relacionadas diretamente com a espuma, os afluentes e efluentes aos reatores R1, R2 e R3 foram monitorados no que diz respeito a uma série de parâmetros, a exemplo de DQO e SST. Apoiando-se nisso, os coeficientes de acumulação de espuma foram relacionados com parâmetros afluentes, por exemplo, volume de espuma ou massa de ST de espuma por massa de DQO aplicada ou de SST aplicados.

4.8 Cálculo da influência da camada de espuma na qualidade do efluente

Para se obter informações sobre a provável influência dos sólidos constituintes da camada de espuma na qualidade do efluente dos reatores UASB R1, R2 e R3, criou-se uma hipotética condição de não haver a retenção da espuma na superfície do decantador. Para esse efeito, calculou-se o quanto de DQO e SST da camada de espuma teriam saído conjuntamente com o efluente no tempo de uma fase experimental (4 fases para os reatores R1 e R2 e 1 fase para o R3).

De forma mais explícita, possuindo os volumes acumulados e do valor médio de DQO e ST da camada de espuma, a vazão de operação do reator e o tempo de duração para as acumulações consideradas, em geral, o tempo completo da fase experimental, aplicou-se as Equações 4.6 e 4.7 para se obter os resultados.

$$DQO_{\text{ESCUMA EFLUENTE}} = \frac{V_{\text{ESCUMA}} \cdot DQO_{\text{MÉDIA}}}{86400 \cdot Q \cdot T} \quad (4.6)$$

Na qual:

$DQO_{\text{ESCUMA EFLUENTE}}$ = concentração de DQO da espuma no efluente do reator (mg/l)

V_{ESCUMA} = volume total de espuma acumulado em um período (l)

$DQO_{\text{MÉDIA}}$ = DQO média da espuma em um período (mg/l)

Q = vazão afluyente ao reator (l/s)

T = tempo decorrido para as acumulações de espuma consideradas (d)

$$SST_{\text{ESCUMA EFLUENTE}} = \frac{V_{\text{ESCUMA}} \cdot ST_{\text{MÉDIA}}}{86400 \cdot Q \cdot T} \quad (4.7)$$

Na qual:

$SST_{\text{ESCUMA EFLUENTE}}$ = concentração de SST da espuma no efluente do reator (mg/l)

V_{ESCUMA} = volume total de espuma acumulado em um período (l)

$ST_{\text{MÉDIA}}$ = ST médios da espuma em um período (mg/l)

Q = vazão afluyente ao reator (l/s)

T = tempo decorrido para as acumulações de espuma (d)

O incremento de ST de espuma no efluente pode ser entendido como incremento de SST, pois que a espuma é essencialmente constituída de sólidos suspensos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir deste capítulo são mostrados os resultados obtidos e trabalhados e as discussões levantadas. Importa enfatizar que as principais hipóteses desta pesquisa foram as relacionadas com as seguintes diferenças quantitativas e qualitativas para a camada de espuma acumulada:

- Diferenças entre os reatores UASB R1 e R2 (reator com sistema de peneiramento forçado antecedente);
- Diferenças observadas em cada reator UASB (R1 e R2) ao longo das fases operacionais **1** (TDH = 9 h, $V_{asc.} = 0,50$ m/h e AITD = $3,1$ m²), **2** (TDH = 7 h, $V_{asc.} = 0,71$ m/h e AITD = $3,1$ m²), **3** (TDH = 5 h, $V_{asc.} = 1,10$ m/h e AITD = $3,1$ m²) e **4** (TDH = 9 h, $V_{asc.} = 0,50$ m/h e AITD = $2,2$ m²);
- Diferenças na espuma originária do decantador e do interior do separador trifásico de ambos reatores UASB (R1 e R2);
- Variações na espuma originária do decantador do reator UASB R3 no decorrer do tempo prolongado de avaliação.

5.1 Características do esgoto de alimentação

A Tabela 5.1 apresenta os valores médios e correspondentes desvios padrões para os parâmetros DQO e SST do afluente aos reatores UASB R1, R2 e R3, dentro dos períodos estudados. Por esses resultados entende-se que o esgoto doméstico que afluiu às unidades de tratamento se mostrou ligeiramente diluído, em termos médios, relativamente às faixas típicas reportadas em literatura, em quase todas as fases da pesquisa (DQO de 363-472 mg/l e SST de 170-232 mg/l). Von Sperling (2005) expõe os valores usuais para DQO e SST de esgotos sanitários dentro das faixas 450-800 mg/l e 200-450 mg/l, respectivamente. No apêndice A encontram-se todos os valores dos parâmetros do afluente aos reatores.

Tabela 5.1 – Características físico-químicas do esgoto afluente aos reatores UASB

| Fase* | Média afluente de DQO (mg/l) | | | Média afluente de SST (mg/l) | | |
|-------|------------------------------|-----------|-----------|------------------------------|----------|----------|
| | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 |
| 1 | 363 ± 136 | 374 ± 141 | 397 ± 85 | 222 ± 46 | 232 ± 36 | 170 ± 31 |
| 2 | 397 ± 85 | 398 ± 94 | 429 ± 103 | 170 ± 31 | 188 ± 25 | 211 ± 35 |
| 3 | 429 ± 103 | 411 ± 72 | 472 ± 47 | 212 ± 34 | 217 ± 53 | 209 ± 26 |
| 4 | 442 ± 51 | 431 ± 78 | 415 ± 41 | 207 ± 23 | 189 ± 31 | 205 ± 21 |

*para o reator R3 não houve 4 fases operacionais distintas, mas 4 campanhas de amostragem da camada de espuma acumulada em uma única fase operacional prolongada

Comparativamente, as características médias do afluente para qualquer dos reatores, com o passar de cada fase operacional, para os reatores R1 e R2, e de cada campanha de amostragem, para o reator R3, não apresentaram diferenças expressivas, avaliando-se em conjunto as concentrações de DQO e SST. Também, uma comparação efetuada entre os valores desses parâmetros para os três reatores entre si não demonstra, evidenciadamente, diferenças que desqualifiquem a proximidade das concentrações de DQO e SST dos afluentes.

Tal retrato propõe que, em termos dos parâmetros avaliados, não houve expressiva diferença entre os afluentes aos reatores UASB R1 e R2 em uma mesma fase operacional, e também entre as fases para qualquer dos reatores. Portanto, diferenças na acumulação e/ou caracterização físico-química da espuma obtida nos reatores não puderam ser imputadas às características do afluente no que diz respeito a DQO e SST. Adicionalmente, em pesquisa paralela, comprovou-se que o efeito do peneiramento forçado sobre o afluente ao reator UASB R2 foi o de diminuir o tamanho médio de partículas e não o de reduzir concentrações de parâmetros genéricos como DQO e SST (TEIXEIRA *et al.*, 2005).

5.2 Caracterização visual da espuma acumulada nos reatores UASB

As espumas acumuladas nos decantadores dos reatores UASB R1 e R2, durante as fases operacionais 1 e 2 foram aparentemente semelhantes, em grande parte do tempo. Constituíam-se em uma camada de material flutuante na superfície líquida exposta à atmosfera, não muito espessa e bastante úmida. As Figuras 5.1 e 5.2 mostram a camada de espuma acumulada na superfície do decantador do reator R1 nas fases 1 e 2.

A seu turno, durante a fase 3 houve a caracterização de uma camada bastante diferenciada de espuma, logo de início para o reator R2 e com o passar do tempo para o reator R1. O que se verificou foi a acumulação de uma camada muito espessa e ressecada, sendo constituída, essencialmente, por lodo anaeróbico do próprio reator. A Figura 5.3 mostra a camada de espuma desenvolvida na fase 3, por exemplo, para o reator R2. Essa parece ter sido a característica da camada de espuma encontrada por Rocha (2002), que apesar de ter se acumulado no interior do separador, também se manteve exposta à atmosfera. Portanto, provavelmente o menor TDH (5 h) e a maior V_{asc} (1,1 m/h) foram os motivadores desse efeito mais pronunciado de arraste e/ou flotação da biomassa dos reatores, a qual solidificou-se na superfície exposta do reator.

Para a fase operacional 4, em geral, houve uma maior semelhança novamente com as características verificadas para as escumas acumuladas durante as fases 1 e 2, especialmente após um período inicial de adaptação à fase. A Figura 5.4 atesta o retorno quase completo para o tipo de espuma encontrado nas fases 1 e 2. Assim, justifica-se esse retorno a uma camada de espuma mais úmida e menos espessa em função das condições operacionais serem mais próximas daquelas encontradas para as fases iniciais.

No que tange à espuma do decantador do reator UASB R3, ela também se revelou úmida e não muito espessa, sendo constituída por uma matriz de sólidos, à qual se agregavam particulados diversos como plásticos, gravetos e cabelos. Adicionalmente, superficialmente a camada possuía uma coloração esverdeada generalizada em praticamente toda a área de exposição. A Figura 5.5 retrata algumas das características acima informadas para essa espuma. Com isso, acredita-se que a menor frequência de retiradas da espuma nesse reator tenha possibilitado o desenvolvimento dessa espuma mais compacta e esverdeada.

Por sua vez, a espuma retirada do interior do separador se mostrou muito líquida, praticamente não se conseguindo coletar grande quantidade de material sólido, mas, ainda assim, os sólidos que predominavam, visualmente, eram lodo anaeróbio e emaranhados de cabelos.

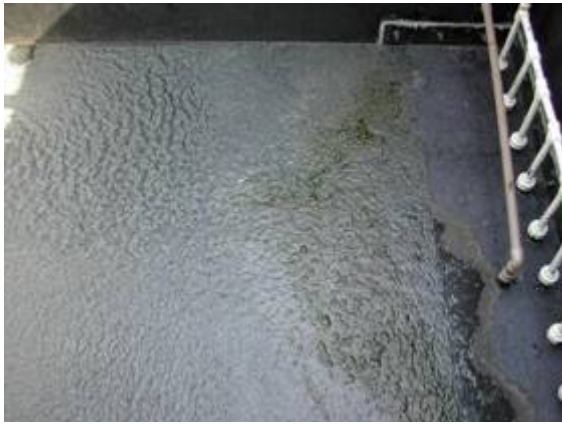


Figura 5.1 – Vista da camada de espuma acumulada durante a fase 1 (decantador do R1)



Figura 5.2 – Vista da camada de espuma acumulada durante a fase 2 (decantador do R1)



Figura 5.3 – Vista da camada de espuma acumulada durante a fase 3 (decantador do R2)



Figura 5.4 – Vista da camada de espuma acumulada durante a fase 4 (decantador do R1)



Figura 5.5 – Vista da camada de espuma acumulada no decantador do reator R3

5.3 Caracterização quantitativa da espuma acumulada nos reatores UASB

5.3.1 Acumulação da espuma no decantador dos reatores UASB R1 e R2

5.3.1.1 Acumulação em cada fase e reator

As Figuras 5.6 e 5.7 mostram todos os valores resultantes das medições e cálculos para o coeficiente de acumulação de espuma na forma de massa de sólidos de espuma em relação à massa de matéria orgânica aplicada. Para todas as fases operacionais (1 a 4) e para os dois reatores (R1 e R2) percebe-se a variabilidade dos dados.

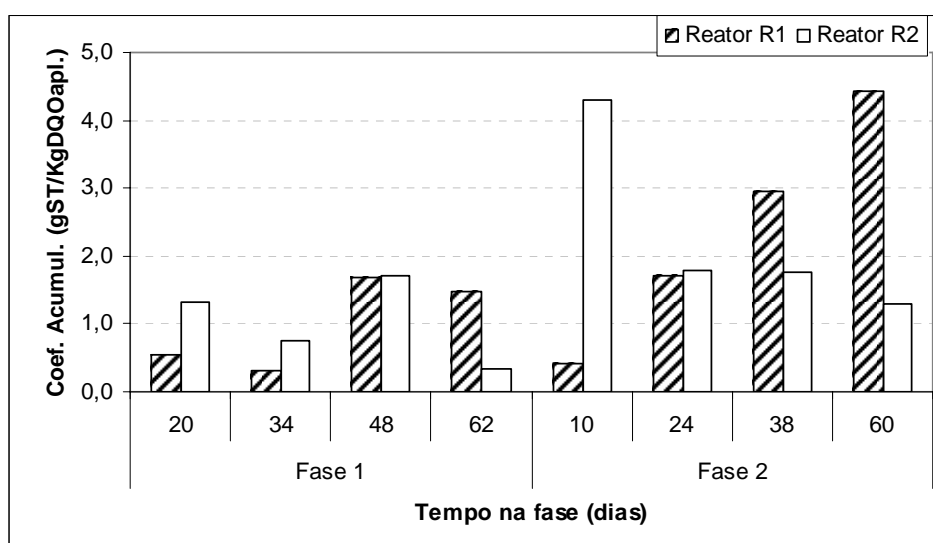


Figura 5.6 – Coeficientes de acumulação de espuma do decantador nas fases 1 e 2

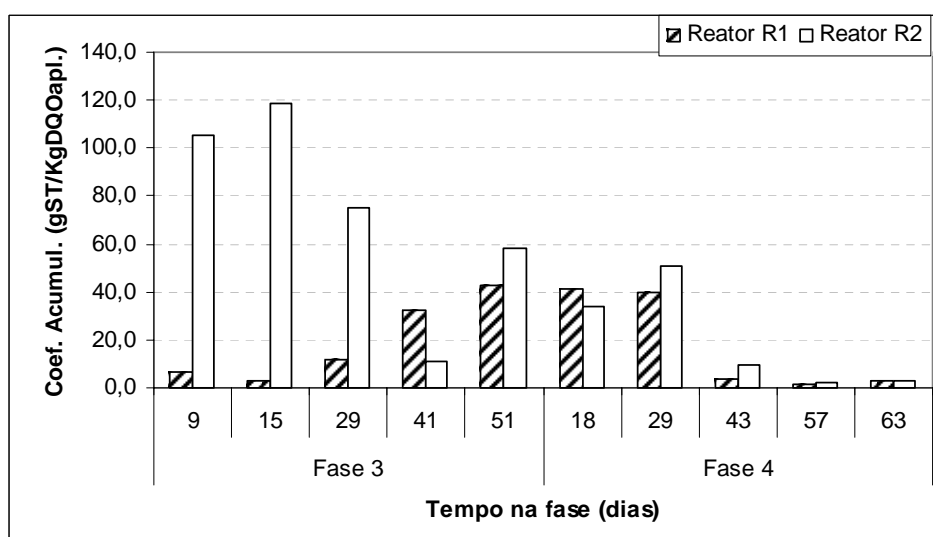


Figura 5.7 – Coeficientes de acumulação de espuma do decantador nas fases 3 e 4

Em geral, pelos gráficos das Figuras 5.6 e 5.7, não se nota uma razoável constância nos valores e, de modo contrário, é verificado um certo crescimento no coeficiente de acumulação para o reator R1 contrapondo-se a um decrescimento para o reator R2, ao longo de cada fase, excetuando-se dessa consideração a fase 4. O apêndice B mostra todos os resultados numéricos para todos os tipos de coeficientes calculados em todas as fases.

Por sua vez, na fase 4 tem-se uma intensificação da variabilidade dos dados encontrados, de maneira clara dos dois primeiros valores de cada reator em relação aos três subseqüentes. Essa constatação motivou, na posterior organização das médias e dos gráficos Box-Whiskers dos dados, a exclusão dos dois primeiros coeficientes obtidos. A justificativa para tal diferença amostral é que a estabilização de acúmulos de espuma próprios da fase foi sobremaneira dificultada na fase 4, possivelmente porque a fase 3 foi a que apresentou os maiores coeficientes de acumulação, influenciando, por isso, a posterior fase 4. Em corroboração a isso, nota-se facilmente que os valores finais para a fase 3 são muito próximos dos valores iniciais para a fase 4, atestando que houve uma manutenção das condições de produção e acumulação de espuma do final da fase 3 para o início da fase 4.

Na seqüência, os resultados de acumulação de espuma foram sistematizados na forma da Tabela 5.2, dividindo-se em quatro tipos de coeficientes para cada uma das quatro fases experimentais. As médias são evidenciadas pelo sombreado. Obviamente, os valores dos coeficientes que têm como unidade volume ou massa de sólidos de espuma por massa de SST aplicados apresentam-se mais elevados do que os correspondentes por massa de DQO aplicada, pois que as concentrações de SST nos esgotos sanitários são menores que as de DQO.

Inicialmente e de uma maneira geral, verifica-se, para as duas primeiras fases, que os valores dos coeficientes de acumulação de espuma foram bastante reduzidos (por exemplo, para o R1 na fase 2, 0,035 l/kg DQO_{apl.} e 2,38 gST/kg DQO_{apl.}), o que facilitou o controle dessa camada no decantador dos reatores R1 e R2. Para essas duas fases os desvios padrões (DP) em relação às médias, o que forneceu os coeficientes de variação (CV) também listados, mostraram-se relativamente elevados, em torno de 60 %.

Tabela 5.2 – Coeficientes de acumulação de espuma em todas as fase operacionais para os decantadores dos reatores R1 e R2

| Fase | Parâmetro estatístico | Coeficiente de acumulação de espuma | | | | | | | |
|------|-----------------------|-------------------------------------|-------|---------------|-------|-------------|-------|---------------|--------|
| | | l/kgDQOapl. | | gST/kgDQOapl. | | l/kgSSTapl. | | gST/kgSSTapl. | |
| | | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 1 | Média | 0,012 | 0,012 | 1,00 | 1,04 | 0,020 | 0,020 | 1,52 | 1,56 |
| | DP | 0,007 | 0,007 | 0,68 | 0,61 | 0,013 | 0,011 | 0,97 | 0,75 |
| | CV (%) | 62 | 59 | 68 | 59 | 63 | 55 | 64 | 48 |
| | N (un.) | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2 | Média | 0,035 | 0,025 | 2,38 | 2,29 | 0,077 | 0,053 | 5,35 | 5,00 |
| | DP | 0,024 | 0,010 | 1,73 | 1,37 | 0,048 | 0,023 | 3,61 | 3,18 |
| | CV (%) | 67 | 40 | 73 | 60 | 63 | 43 | 67 | 64 |
| | N (un.) | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 3 | Média | 0,151 | 0,493 | 19,21 | 73,61 | 0,306 | 0,875 | 39,09 | 130,05 |
| | DP | 0,116 | 0,256 | 17,30 | 42,45 | 0,233 | 0,403 | 34,92 | 68,42 |
| | CV (%) | 76 | 52 | 90 | 58 | 76 | 46 | 89 | 53 |
| | N (un.) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 4 | Média | 0,028 | 0,054 | 2,73 | 4,92 | 0,061 | 0,112 | 5,80 | 10,17 |
| | DP | 0,016 | 0,040 | 1,41 | 4,23 | 0,036 | 0,077 | 3,24 | 8,07 |
| | CV (%) | 56 | 75 | 52 | 86 | 60 | 69 | 56 | 79 |
| | N (un.) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

DP: desvio padrão

CV: coeficiente de variação

N: número de amostras

Uma comparação unicamente entre as médias para as duas primeiras fases revela uma maior acumulação para a fase 2. Por exemplo, para o R1, 1,00 gST/kg DQO_{apl.} na fase 1 e 2,38 gST/kg DQO_{apl.} na fase 2, possivelmente como função das condições operacionais diferenciadas (menor TDH e maior V_{asc.} para fase 2). A seu turno, comparações entre os dois reatores, R1 e R2, para mesma fase, não evidenciam diferenças levando-se em conta as médias e desvios padrões. Por exemplo, na fase 1, média de 2,38 e DP de 1,73 gST/kg DQO_{apl.} para o R1 e média de 2,29 e DP de 1,37 gST/kg DQO_{apl.} para o R2.

Por sua vez, a fase 3 apresentou valores médios consideravelmente maiores que as duas primeiras fases (por exemplo, para o R2, 73,61 gST/kg DQO_{apl.}). Isto representou, do ponto de vista da operação de retiradas da espuma acumulada, um grande dificultador de gerenciamento. Adicionalmente, a variabilidade dos coeficientes de acumulação para o reator R1 mostrou-se maior, atingindo 90 % para o coeficiente na unidade de gST/kg DQO_{apl.}, o que pode ser justificado pela mais intensa evolução dessa variável ao longo da fase.

A seu turno, para a fase 4, já com os dois valores iniciais excluídos, houve redução expressiva do coeficiente de acumulação médio em relação à fase 3, para os dois reatores. Ficou claro que o retorno às condições operacionais mais próximas daquelas da fase 1 promoveram tal

redução. No entanto, talvez ainda alguma influência da superprodução de espuma da anterior fase 3 possa explicar a maior proximidade dos valores da fase 4 com os da fase 2.

Na seqüência, exploraram-se os mesmos resultados, organizados graficamente para dois tipos de coeficientes de acumulação, no formato de gráficos Box-Whiskers. As Figuras 5.8 e 5.9, já em suas feitura, revelaram algo comentado em linhas acima, a grande disparidade entre os valores das duas primeiras fases operacionais em relação à terceira, demandando, por isso, a colocação do eixo das ordenadas em escala logarítmica. Assim, conseguiu-se encaixar todos os valores de todas as fases, para um dado coeficiente, em um mesmo gráfico, sem diminuir demasiadamente de tamanho algumas informações gráficas. Todavia, houve que se ter o cuidado de não estabelecer uma análise linear convencional sobre o eixo logarítmico.

Os gráficos para os dois tipos de coeficientes de acumulação foram colocados unicamente com o objetivo de mostrar que as informações, dentro da perspectiva comparativa, emanadas por eles são as mesmas. Importa ressaltar que há ainda o agravante de que são gráficos com as duas unidades distintas, isto é, tanto a que caracteriza a espuma – grama de ST ou litro – quanto a que caracteriza o afluente – quilograma de DQO ou de SST. Portanto, tanto fazia explorar qualquer um dos gráficos dos coeficientes trabalhados, a não ser que se quizesse a informação absoluta dos valores retratados por eles.

Com as Figuras 5.8 e 5.9, para as duas primeiras fases, constata-se, de forma mais patente do que na avaliação anterior sobre as médias, que não há substanciais diferenças entre os marcos de variação dos coeficientes, especialmente no que tange à mediana, para os dois reatores em uma mesma fase. Adicionalmente, confirma-se o fato de que a acumulação de espuma redundou maior na fase 2 para os dois reatores, na medida em que os marcos de variação como um todo se elevaram relativamente aos da fase 1.

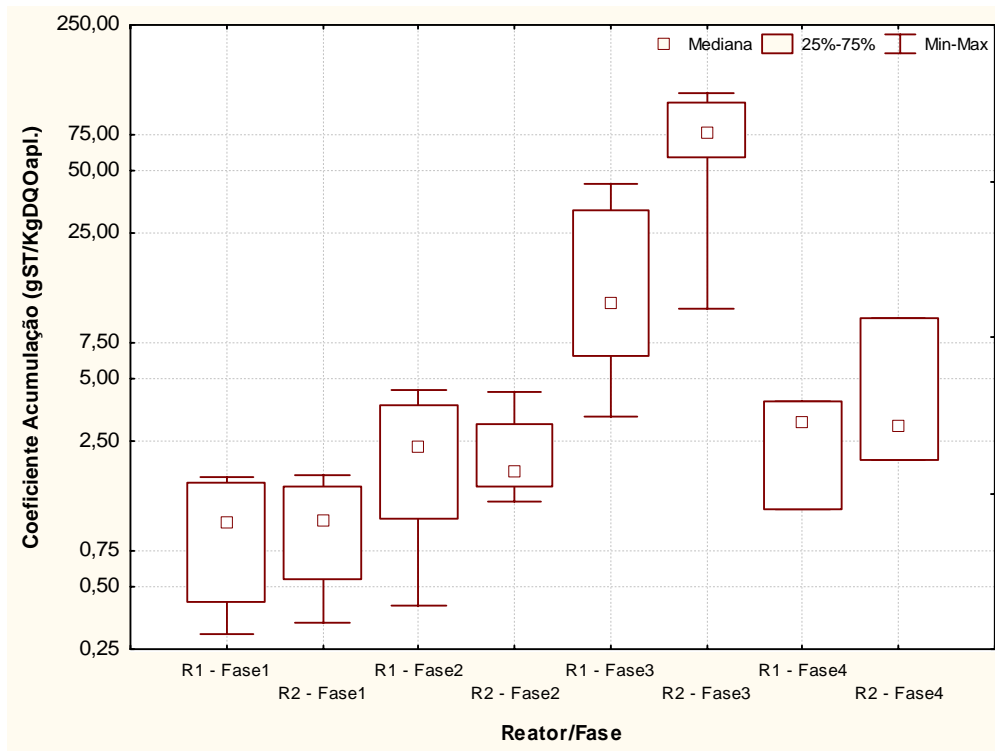


Figura 5.8 – Box-Whiskers do coeficiente de acumulação (gST/kgDQO_{apl.}) de espuma no decantador em todas fases

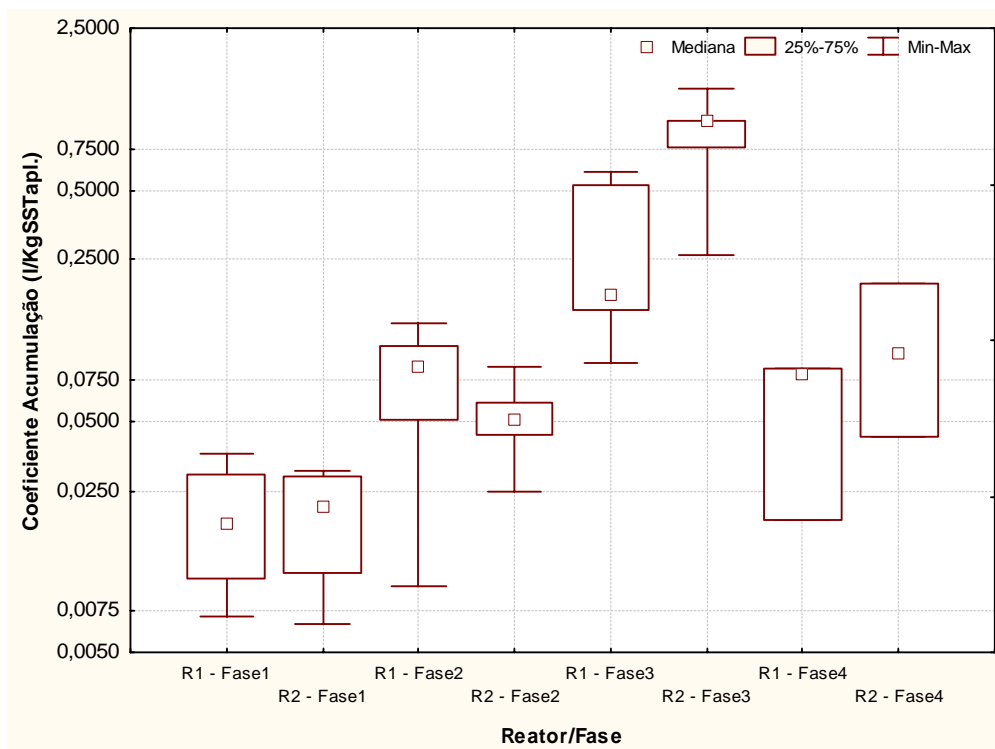


Figura 5.9 – Box-Whiskers do coeficiente de acumulação (l/kgSST_{apl.}) de espuma no decantador em todas fases

A primeira constatação do parágrafo acima possibilita refutar a hipótese inicial de que o precedente peneiramento forçado do esgoto bruto afluente a um reator UASB conseguiria criar condições para minimização da formação e acúmulo de espuma na superfície do reator. Todavia, tal negação fica restrita, até esse momento, à espuma do decantador e às condições hidráulicas impostas por essas duas fases, marcadas pelos TDH de 9 e 7 horas, velocidades ascensionais de 0,50 e 0,71 m/h e AITD de 3,1 m².

Uma possível explicação para o fato de ter havido um incremento na acumulação de espuma da primeira para a segunda fase é a de maior perda de SST da zona de digestão para a zona de decantação. Como houve um aumento na velocidade ascensional do líquido no reator e diminuição do TDH dos reatores UASB, provavelmente mais SST, constituídos de flocos de lodo anaeróbio mais leves ou de material não degradado do afluente, foram carreados da zona de digestão para a zona de decantação sem terem condições de retornar para a zona de digestão. Isso promoveria um incremento do teor de SST no efluente e também do acúmulo de sólidos na camada de espuma. Tal fato é pobremente confirmado pelos valores médios de SST no efluente dos reatores. Estes aumentaram de 58 (\pm 21) e 65 (\pm 29) mg/l na fase 1 para 66 \pm (19) e 75 \pm (21) mg/l na fase 2, respectivamente, para o R1 e R2.

Passando a análise para a fase 3, ainda sob elementos extraídos das Figuras 5.8 e 5.9, tem-se que os marcos de variação dos coeficientes são muito mais elevados, sendo a elevação extremada para o reator R2. De fato, o acúmulo de espuma apresentou um grande aumento, tendo o lodo dos próprios reatores como principal contribuinte à camada acumulada. Portanto, os flocos anaeróbios teriam sido arrastados e/ou teriam flotado motivados pelo TDH e pela $V_{asc.}$ mais restritivos de todos, isto é, respectivamente, 5 horas e 1,1 m/h. Contrariando esses resultados, Versiani (2005), operando um reator UASB em TDH e $V_{asc.}$ variados, não verificaram efeito de flotação do lodo ou de arraste em excesso de sólidos mesmo em TDH de 3 h e $V_{asc.}$ de 1,6 m/h. Talvez, a justificativa para esse feito operacional esteja na ótima mistura verificada no reator em função de uma AITD de aproximadamente 1,64 m².

Esse efeito de arraste de sólidos e biomassa, percebido pela formação de espuma e motivado por elevadas velocidades ascensionais, é levantado por Mahmoud *et al.* (2003). A seu turno, Halalsheh *et al.* (2005) e Mahmoud *et al.* (2003) informam que o efeito de flotação do lodo tende a ocorrer quando o tempo de retenção de sólidos (TRS) for diminuído, seja por diminuição do TDH ou aumento da carga de sólidos afluentes. Particularmente para a fase 3

do presente estudo, os dois fatores, menor TDH e maior carga de sólidos, ocorreram simultaneamente. Nesse sentido, pode ser que o efeito de flotação da biomassa tenha predominado sobre o de arraste dos sólidos contidos no leito de lodo.

Em continuidade, uma diferença é percebida entre as acumulações de espuma dos dois reatores para a fase 3. Essa diferença se manifestou como maiores coeficientes de acumulação para a espuma do reator R2. Talvez, para as condições operacionais instauradas durante a fase 3, o peneiramento forçado revele sua atuação, ao reduzir o tamanho médio das partículas afluentes ao reator UASB. Este fato, se por um lado acelera as taxas de conversões metabólicas dentro do reator devido às questões cinéticas e de transferência de massa, por outro pode reduzir a capacidade de sedimentação de sólidos e dificultar a formação de agregados de microrganismos, o que favoreceria o arraste e flotação de lodo anaeróbio para a zona de decantação.

No que tange aos marcos de variação dos dados da fase 4 (Figura 5.8 e 5.9), também não se comprova diferença entre a acumulação de espuma nos dois reatores. Portanto, o retorno ao TDH de 9 horas e a velocidade ascensional de 0,50 m/h foram suficientes para aproximar os coeficientes de acúmulo dos reatores R1 e R2 e também reduzir substancialmente os seus valores relativamente aos da fase 3, com a exclusão do referido período de adaptação à fase.

Nesse sentido, a fase 4, a qual retorna para a grande maioria dos parâmetros reinantes na fase 1, a exceção da área de influência dos tubos distribuidores, inicia com coeficientes de acumulação da espuma em níveis quase idênticos aos do final da fase 3 (Figura 5.7), para ambos reatores. A provável explicação para esse fato é que a fase 3, como foi superprodutora de espuma, acabaria influenciando a subsequente fase 4. Importa destacar que o lodo usado em cada fase foi o da fase anterior apenas com eventual adequação quantitativa, isto é, buscando sempre a massa biológica mínima para o tratamento. Com isso, no início da fase 4, o lodo teria mantido as características do final da fase 3, isto é, elevado potencial de formação de espuma, até que houvesse uma estabilização por influência da nova fase. Isto foi sentido a partir da terceira medição efetuada na quarta fase, com redução substancial no coeficiente de acúmulo.

Portanto, com respeito a este último aspecto, os valores de acumulação de espuma para a quarta fase retornaram, nas três últimas mensurações, a níveis das primeiras duas fases. A partir dessa situação, a comparação entre as fases 1 e 4 tende a ser relevante. Para elas se

praticou o mesmo TDH e a mesma velocidade ascensional, tendo ocorrido apenas uma redução da área de influência do tubo de distribuição da fase 1 para a 4 (de 3,1 para 2,2 m²). Assim, observa-se uma maior taxa de acúmulo de espuma na fase 4, o que dificilmente seria motivado por uma melhor condição de mistura proporcionada pela menor área de influência do tubo distribuidor na fase 4. Talvez, ainda algum resquício de influência da fase 3 estivesse atuando, ou mesmo, a condição climática fosse mais desfavorável com chuvas menos freqüentes, na medida em que a fase 4 desenvolveu-se num período menos chuvoso (agosto e setembro). Lembrando que, como o reator é aberto, a ação da chuva tende a desconstituir a camada de espuma formada.

5.3.1.2 Evolução da acumulação ao longo de cada fase

Uma avaliação das evoluções temporais dos coeficientes de acumulação para todas as fases, a exceção da fase 4, foi depreendida por meio das Figuras 5.10, 5.11 e 5.12. As informações geradas mostraram-se relevantes, pois apresentaram características do processo de acumulação no tempo abrangido por uma fase experimental, para as várias condições operacionais delineadas. As séries de tempo foram escolhidas para um único tipo de coeficiente em função das razões já comentadas e são mostradas em gráficos de dispersão com as correspondentes linhas de tendências ajustadas.

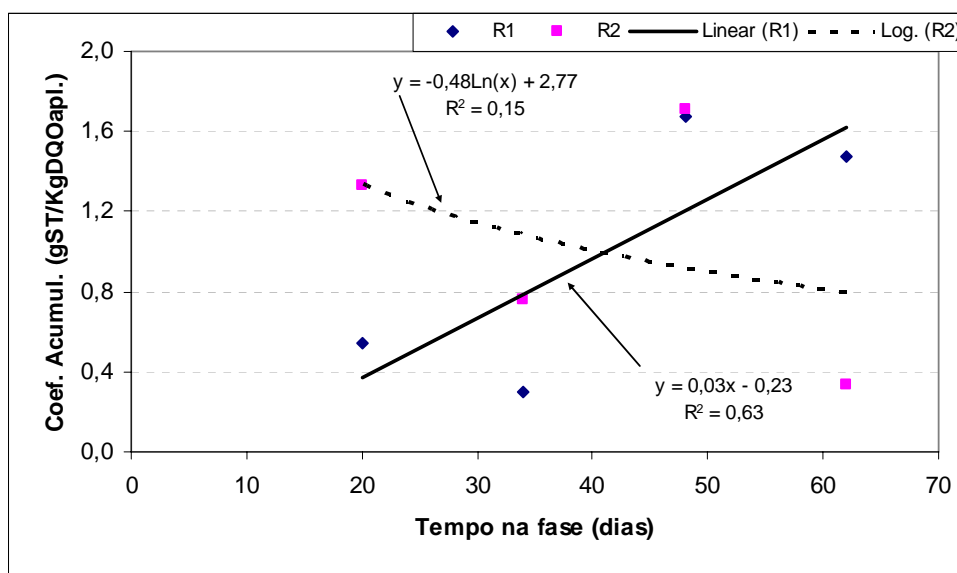


Figura 5.10 – Evolução temporal e ajuste para o coeficiente de acumulação de espuma do decantador na Fase 1

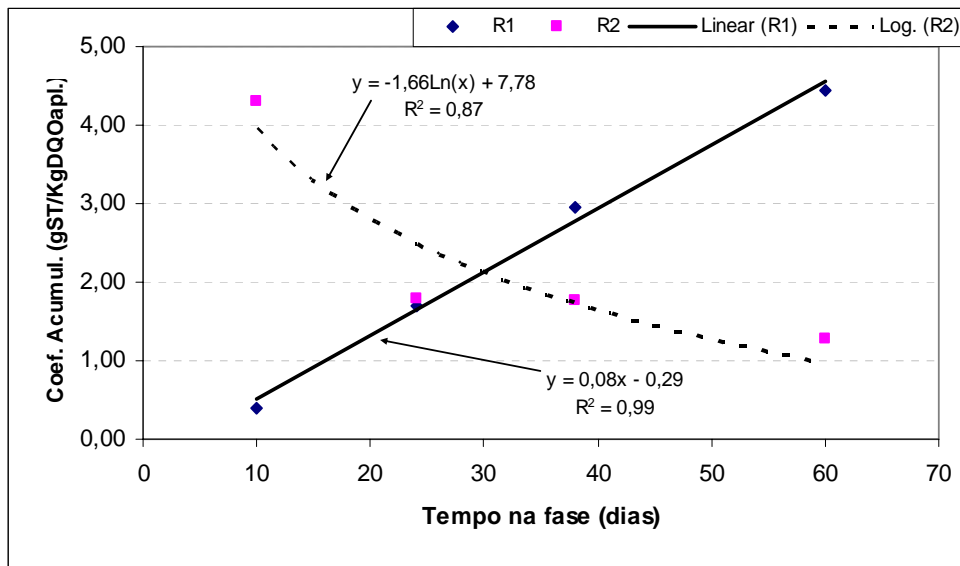


Figura 5.11 – Evolução temporal e ajuste para o coeficiente de acumulação de espuma do decantador na Fase 2

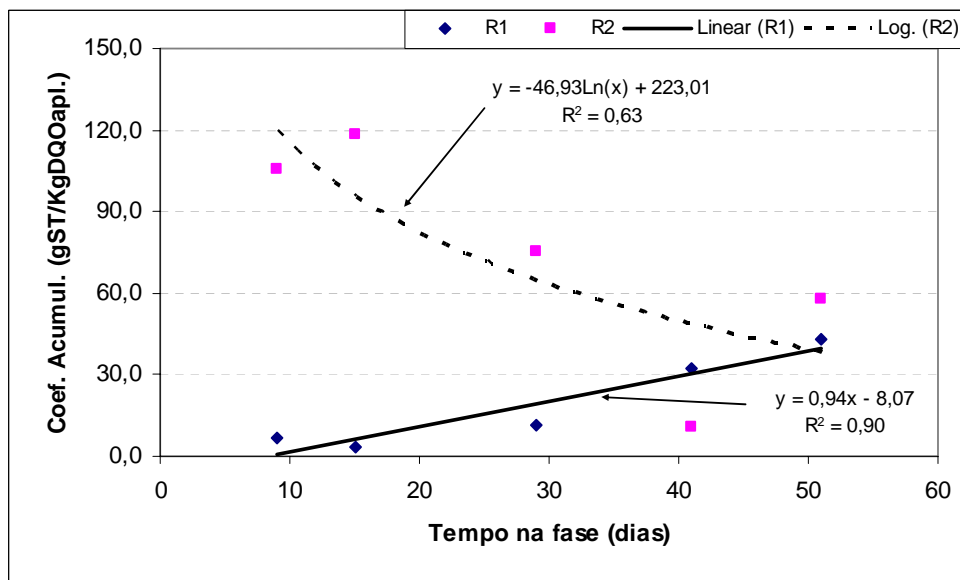


Figura 5.12 – Evolução temporal e ajuste para o coeficiente de acumulação de espuma do decantador na Fase 3

Em geral, com esses gráficos indica-se a tendência de que, para todas as fases até a terceira, o coeficiente de acumulação da espuma evolua crescentemente para o reator R1 e decrescentemente para o R2. Portanto, tal constatação delineia um quadro de diferença no padrão evolutivo dos coeficientes de acúmulo de espuma no decantador, durante a operação, entre os reatores R1 e R2, que se torna extremo na terceira fase experimental.

Das linhas de tendências pesquisadas, com auxílio do programa Microsoft Excel[®], as que melhor se ajustaram com os dados experimentais foram, em geral, a de crescimento linear

para o coeficiente de acumulação de espuma no reator R1 e a de decrescimento logarítmico para o coeficiente no reator R2.

Percebe-se diretamente pelos coeficientes de determinação (R^2), mostrados nos gráficos juntamente com as equações de ajuste, que as aproximações entre a evolução dos dados experimentais e a linha de ajuste conseguida para o coeficiente de acumulação do reator R1 variou de razoável na fase 1 (63 %), a excelente na fase 2 (99 %), sendo ainda muito boa na fase 3 (90%). A seu turno, as correlações decrescentes correspondentes ao coeficiente do reator R2 encontrou valor ruim na fase 1 (15%), porém tornando-se muito boa na fase 2 (87 %) e razoável na fase 3 (63%). Como a fase 4 foi alvo de exclusão dos primeiros valores obtidos para o coeficiente de acumulação, os restantes 3 dados não forneceram segurança para estabelecer alguma tendência evolutiva nos dados.

A Figura 5.12 permite a clara percepção de que a terceira fase se inicia com o grande problema de arraste e/ou flotação em excesso do lodo anaeróbio no reator R2. Não obstante o reator R1 estar sujeito às mesmas condições extremadas no que tange a TDH baixo, carga de sólidos mais elevada e velocidade ascensional majorada, o mesmo não demonstrou de pronto uma resposta a este estímulo.

Apoiando-se nas informações de que o lodo é um contribuinte efetivo à camada de espuma e que condições operacionais extremas incrementam seu potencial de formação de espuma, aventa-se a hipótese de que a diferença verificada entre os dois reatores, no que toca às acumulações iniciais de espuma, é gerada por diferenciadas características do lodo biológico nos reatores, que se manifesta em sua propriedade de sedimentabilidade ou flotabilidade. Dessa forma, a partir da diferença do peneiramento forçado antecedendo a apenas um dos reatores UASB testados, o lodo do reator R2 revelaria, inicialmente, piores condições de sedimentabilidade e ou maior tendência de flotabilidade, o que teria como resposta maior formação de espuma. Com a evolução da fase o lodo do reator conseguiria se adaptar, selecionando os agregados em condições de se manter no reator.

Supõe-se que para o reator R1 a evolução do coeficiente de acumulação de espuma seja normal, na perspectiva de que, ao longo de uma carreira de crescimento do leito de lodo no perfil do reator, a formação de espuma tenda a incrementar, pois que o reator fica mais cheio de sólidos. Adicionalmente, constituintes particulados formadores da espuma, nesse tempo mais prolongado, podem estar atingindo mais efetivamente a emergência no emaranhado de

retenção constituído pelo leito de lodo, e, na seqüência, atingindo a camada superficial. Assim, ter-se-ia uma maior taxa de formação de espuma impulsionando uma maior taxa de acumulação.

Dessa forma, a fase 3 culminou com coeficientes de acúmulo bastante próximos para os reatores R1 e R2, e ainda muito alto, sobretudo influenciado pelo arraste e/ou flotação do lodo. Contudo é digno de nota que, apesar de ter havido perda considerável de lodo, especialmente no R2, a estabilidade do reator, do ponto de vista de sua eficiência de digestão, não foi comprometida, conforme atestado por pesquisa paralela (DE PAULA, 2005).

5.3.2 Acumulação de espuma no decantador do reator R3 em tempo prolongado

Das Figuras 5.13 e 5.14 extraem-se valores e a evolução temporal dos coeficientes de acumulação de espuma para o reator UASB R3. Como, para esse reator, a espuma do decantador não foi retirada em sua totalidade durante os procedimentos de medição, pôde-se avaliar tendências quantitativas no acúmulo prolongado dessa espuma, isto é, para até mais de sete meses (230 dias). Os dois gráficos mencionados revelam a mesma tendência evolutiva do processo de acumulação.

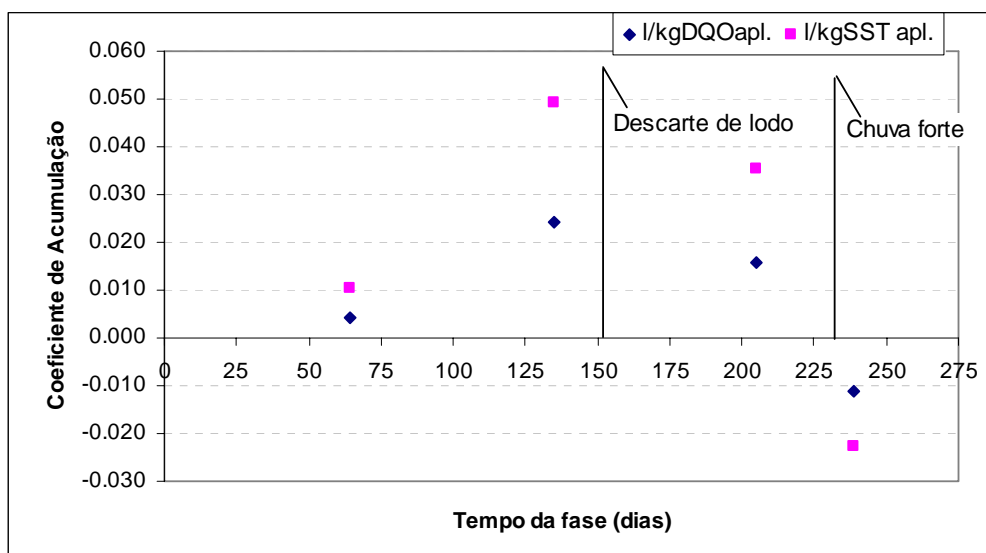


Figura 5.13 – Evolução temporal para os coeficientes de acúmulo em termos de litros de espuma, no reator R3

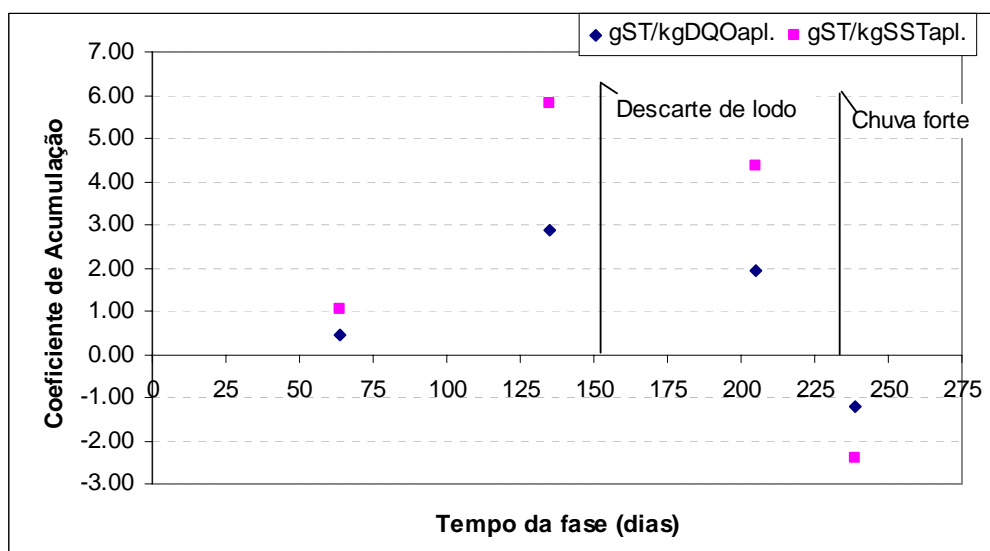


Figura 5.14 – Evolução temporal para os coeficientes de acúmulo em termos de gST de espuma, no reator R3

Inicialmente, consegue-se perceber que um dado coeficiente de acumulação não apresentou valores muito semelhantes no decorrer do experimento, inclusive revelando um coeficiente negativo para a última mensuração do experimento. A tendência evolutiva da acumulação demonstra que os valores dos coeficientes seguiram um passo de crescimento para um valor de pico, passando a um passo de decréscimo na seqüência e finalizando com um valor negativo. Dois foram os eventos que teriam provocado obstáculos evidentes ao maior crescimento da acumulação da camada de espuma, quais sejam, o de descarte do lodo (151 dias de experimento) e o de chuva muito forte (231 dias de experimento).

Dessa forma, dentro do intervalo temporal investigado, se conseguiu vislumbrar alguma perspectiva de autocontrole no processo de acumulação, porque houve evidências de atuação dos fenômenos de diminuição do espessamento da camada. Assim sendo, percebe-se que o descarte de lodo teria influenciado na diminuição da formação de espuma, a qual vinha de uma tendência crescente da primeira mensuração para a segunda. Com isso, o coeficiente de acumulação de espuma reduziu um pouco na terceira mensuração, na medida em que um fator de formação da camada teve sua potencialidade diminuída, isto é, a quantidade de lodo presente no reator também diminuiu.

Por fim, uma forte chuva ocorrida no final do período de acompanhamento parece realmente ter sido a responsável pela redução no volume da camada de espuma, medida na última mensuração, que resultou no coeficiente negativo exposto na Figura 5.14. Semelhante fato foi

verificado por Van Haandel e Lettinga (1994), para a espuma do decantador do reator UASB no Pedregal, a qual foi quebrada ocasionalmente em função de chuvas fortes.

5.3.3 Acumulação de espuma no interior do separador trifásico dos reatores UASB R1 e R2

A acumulação da espuma no interior do separador trifásico, durante a fase 1, não foi investigada em função de problemas com a pressurização da câmara gasosa a partir do biogás produzido. Dois procedimentos de retirada dessa espuma foram desenvolvidos para a fase 2, apenas um para a fase 3 e outro para a fase 4. Com relação aos procedimentos de retirada, não se conseguiu definir a melhor rotina para sua realização, se com pressurização adicional da câmara gasosa, experimentada duas vezes na fase 2, ou com despressurização, experimentada uma vez na fase 3 e outra na 4. Talvez, a dificuldade dessa definição tenha residido no fato, não confirmado, do material acumulado no interior do separador e posteriormente coletado não se apresentar como camada de espuma característica.

Os valores dos coeficientes de acumulação, encontrados a partir das campanhas procedidas, estão expressos em duas das unidades convencionais, para os reatores R1 e R2, expostos na Tabela 5.3. Os coeficientes foram representados unicamente na unidade de massa de sólidos de espuma, pois, em função do volume líquido retirado ter sido excessivo, uma unidade volumétrica daria uma impressão equivocada da quantidade de material acumulado.

Tabela 5.3 – Resultados dos coeficientes de acumulação de espuma no interior do separador trifásico dos reatores R1 e R2

| Retirada | Coef. Acumul. (gST/kgDQO _{apl.}) | | Coef. Acumul. (gST/kgSST _{apl.}) | |
|-----------|--|------|--|------|
| | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 1ª Fase 2 | 1,26 | 0,77 | 2,98 | 1,68 |
| 2ª Fase 2 | 0,29 | 0,16 | 0,68 | 0,33 |
| Fase 3 | 0,66 | 0,40 | 1,42 | 0,86 |
| Fase 4 | 0,56 | 0,11 | 1,20 | 0,26 |

Comparando-se os valores das taxas de acúmulo obtidas para o interior do separador com aqueles para o decantador, observa-se facilmente que os primeiros são quase sempre inferiores. A partir da fase 2, as menores médias para os coeficientes de acumulação no decantador, dentre todas as fases, são as da fase 2, quais sejam, 2,38 e 2,29 gST/kgDQO_{apl.}, para o R1 e R2, respectivamente. Por sua vez, nessa mesma fase a primeira mensuração para a espuma do separador situou os coeficientes em 1,26 e 0,77 gST/kgDQO_{apl.}, respectivamente, para o R1 e R2. Considerando que estes valores já são bastante inferiores aos médios para a

escuma do decantador, e que, posteriormente, os coeficientes para a escuma do separador decrescem ainda mais, inclusive na segunda medição da fase 2, pode-se dizer que a acumulação de escuma medida foi bem menor no interior do separador trifásico.

Uma hipótese para explicar as baixas taxas de acumulação da escuma do separador seria a de ocorrer uma biodegradação mais efetiva do material no interior do separador trifásico do que na superfície do decantador, favorecida pela agitação provocada pelo desprendimento de biogás e pelo maior tempo entre retiradas do material acumulado no interior do separador. Uma outra hipótese plausível para justificar o fato em questão é que a agitação do desprendimento do biogás possivelmente provocaria uma desagregação do emaranhado de partículas eventualmente presentes na camada superficial. Tais partículas, agora isoladas e sem bolhas de gás incorporadas, poderiam sedimentar até a zona de digestão ou eventualmente se dirigir para a zona de decantação, arrastadas pela maior velocidade desenvolvida na abertura para o decantador.

A comparação desses resultados de coeficientes, obtidos no presente trabalho, com os de outras referências citadas se tornou difícil em função das unidades adotadas por elas serem diferentes. A única referência com unidades próximas foi a de Santos (2003), no entanto, tal trabalho adotou a unidade volumétrica para a escuma, a qual não foi usada para a presente pesquisa em função das razões comentadas.

Ainda assim, parece possível dizer que a acumulação de escuma foi maior na pesquisa de Santos (2003), na medida em que o coeficiente encontrado foi de 0,16 l/kg DQO_{apl.} e a camada foi retratada como bastante volumosa. Uma aventada explicação para tal diferença de acumulação é que no trabalho de Santos (2003) a operação do reator se daria em uma carga biológica muito reduzida, pois o TDH médio foi muito alto (57 h), além disso, o desenho do reator mostra uma área aparentemente excessiva para a superfície no interior do separador.

Uma das poucas tendências claras observadas nos resultados da Tabela 5.3 foi que o acúmulo de escuma se mostrou sempre maior para o reator R1 do que para o R2. Isso, mais uma vez, possivelmente em função do peneiramento forçado do esgoto imprimir melhores condições metabólicas para a digestão no reator R2. Tal condição tende a promover maior taxa de geração de biogás e, conseqüentemente, maior taxa de desprendimento do biogás no interior do separador. Situação esta que facilita um natural controle da camada de escuma formada

nesse compartimento. Na fase 3, este efeito teria sido preponderante sobre o de flotação em excesso do lodo anaeróbio, verificado sobre os decantadores.

É digno de nota que, para o reator UASB R3, apesar de não ter sido acompanhada a acumulação de espuma no interior do seu separador trifásico, ainda em período de testes preliminares, tentou-se avaliar a espuma que teria se acumulado, sem nunca ter sido retirada, passados mais de dois anos de operação contínua. Contudo, depois de contornadas as dificuldades para acessar esse compartimento, o que se obteve como camada constituída foi algo bastante inesperado. Da mesma forma que posteriormente seria verificado para os separadores dos reatores R1 e R2, um material bastante diluído e sem o aspecto de uma camada característica foi encontrado em seu interior.

5.4 Caracterização físico-química da espuma acumulada nos reatores UASB

5.4.1 Caracterização físico-química da espuma acumulada no decantador dos reatores R1 e R2

Primeiramente buscou-se, a partir dos valores médios dos parâmetros medidos em cada fase operacional e para cada reator, discutir, de forma mais geral, sobre qualidade do material estudado, além de colocar hipóteses do trabalho à prova. A Tabela 5.4 reúne de forma sintética os resultados dos principais parâmetros físico-químicos analisados. Essa organização passa a ter uma maior relevância por causa da representatividade das médias relativamente aos DV, isto é, os CV, com raras exceções, não ultrapassam 30 %. O apêndice C mostra os valores válidos para todos os parâmetros físico-químicos obtidos em todas as fases.

Tabela 5.4 – Resultados das características físico-químicas da espuma do decantador em todas as fases

| Fase | Parâmetro estatístico | Parâmetros físico-químicos (mg/l) | | | | | | | |
|------|-----------------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|--------|--------|------------|----|
| | | ST | | DQO | | DBO | | STV/ST (%) | |
| | | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 1 | Média | 78.158 | 81.533 | 77.249 | 105.019 | 35.450 | 39.033 | 78 | 75 |
| | DP | 13.999 | 8.956 | 27.667 | 26.234 | 15.548 | 17.941 | 5 | 5 |
| | CV (%) | 18 | 11 | 36 | 25 | 44 | 46 | 7 | 7 |
| | N (un.) | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 2 | Média | 87.765 | 95.027 | 134.054 | 156.180 | 41.215 | 41.884 | 65 | 65 |
| | DP | 8.898 | 15.471 | 42.508 | 21.131 | 7.405 | 5.710 | 6 | 6 |
| | CV (%) | 10 | 16 | 32 | 14 | 18 | 14 | 9 | 9 |
| | N (un.) | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 3 | Média | 112.733 | 139.977 | 168.167 | 160.329 | 44.807 | 37.685 | 65 | 60 |
| | DP | 33.282 | 27.793 | 44.442 | 42.972 | 10.478 | 8.917 | 3 | 4 |
| | CV (%) | 30 | 20 | 26 | 27 | 23 | 24 | 5 | 6 |
| | N (un.) | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| 4 | Média | 99.597 | 87.566 | 160.946 | 132.794 | 57.733 | 36.175 | 68 | 70 |
| | DP | 10.442 | 10.643 | 26.104 | 9.141 | 20.916 | 7.441 | 7 | 4 |
| | CV (%) | 10 | 12 | 16 | 7 | 36 | 21 | 10 | 5 |
| | N (un.) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

DP: desvio padrão

CV: coeficiente de variação

N: número de amostras

Uma análise preliminar sobre os dados da Tabela 5.4 já atesta a extrema concentração da espuma do decantador dos reatores UASB R1 e R2 para qualquer parâmetro escolhido. Para cada um dos qualificadores físico-químicos representados pôde-se eleger uma ordem de grandeza numérica que melhor informou sobre a qualidade do material, desconsiderando diferentes fases aplicadas. Nesse sentido, para ST, sugere-se 90.000 mg/l, para DQO, 140.000 mg/l, para DBO, 40.000 mg/l, e para STV/ST, indica-se 70 %. Tais valores levantados

permitiram qualificar a espuma como um material extremamente concentrado de sólidos em meio aquoso, sendo esses sólidos, em boa parte, de natureza orgânica. Adicionalmente, esses resultados se mostram muito maiores que os encontrados por Versiani (2005).

Muito embora esse material ainda se constitua em grande quantidade por água, talvez ele aproxime-se mais da condição de resíduo sólido. Evidentemente, tal fato tem relação direta com o procedimento de retirada da espuma do decantador dos reatores. Assim, como se buscou, quando da retirada, escorrer a água presente na espuma, ainda na peneira de piscina, agiu-se num sentido de promover a concentração ou o desaguamento parcial da massa sólida da espuma.

Voltando-se para uma das essenciais hipóteses do trabalho, a de diferença qualitativa na espuma dos reatores UASB R1 e R2 em função do peneiramento, abstraindo-se até certo ponto das diferenças de fases, deteve-se na observação da Tabela 5.4. De fato, não se percebe uma tendência sustentável e explicável para as diferenças entre as médias refletidas pelos dados. Portanto, os resultados ora apresentados sugerem que não existam razoáveis diferenças na qualidade físico-química da espuma do decantador entre os reatores R1 e R2.

Volvendo a análise para a avaliação da hipótese de diferença ao longo das fases para os reatores em separado, as diferenças começam a se apresentar. De forma evidente, observa-se que as médias de ST seguem um padrão crescente da fase 1 para a 3, em ambos reatores. Também, para as médias de DQO nota-se um crescimento numérico, ao longo das mesmas fases, com o único porém do baixo crescimento da fase 2 para a 3 para o reator R2. Por sua vez, no que toca a DBO nenhuma tendência de crescimento ou decrescimento é sugerida com clareza pelos resultados. Por fim, percebe-se que, da fase 1 para a 3, os dados de STV/ST aparentam decrescer, com a exceção do passo da fase 2 para a 3 no reator R1.

A análise da fase 4 foi propositalmente deixada à parte, pois que é uma fase que não segue o sentido da evolução das condições operacionais da fase 1 para a 3. Na verdade, a fase 4 retorna para vários parâmetros da primeira fase. Assim, se esperaria que houvesse mais similaridades entre as espumas da fase 4 e 1 do que entre as espumas da fase 4 e 2. Provavelmente, a menor ocorrência de chuvas possa ter contribuído para a maior concentração da espuma da fase 4 relativamente à da fase 1.

Os gráficos Box-Whiskers, colocados na forma das Figuras 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18, possibilitaram uma melhor avaliação da variação dos parâmetros em cada fase e para cada reator, além disso, permitindo vislumbrar as tendências evolutivas entre fases com mais fundamentos.

Por meio das Figuras 5.15 e 5.16, os resultados revelam uma evolução crescente da fase 1 para a 3 no que diz respeito ao parâmetros ST e DQO, em confirmação à Tabela 5.4. Por sua vez, com o retorno a parâmetros operacionais mais relaxados na fase 4, houve uma aparência de decréscimo para os mesmos qualificadores. Portanto, o que se evidencia nesse processo é que a diminuição do TDH nos compartimentos do reator e, conjuntamente, o aumento da velocidade ascensional tendem a promover uma intensificação na concentração da espuma como função de um maior aporte de sólidos à camada de espuma. Isto é, os sólidos teriam menos possibilidades de ficarem retidos na massa biológica em digestão.

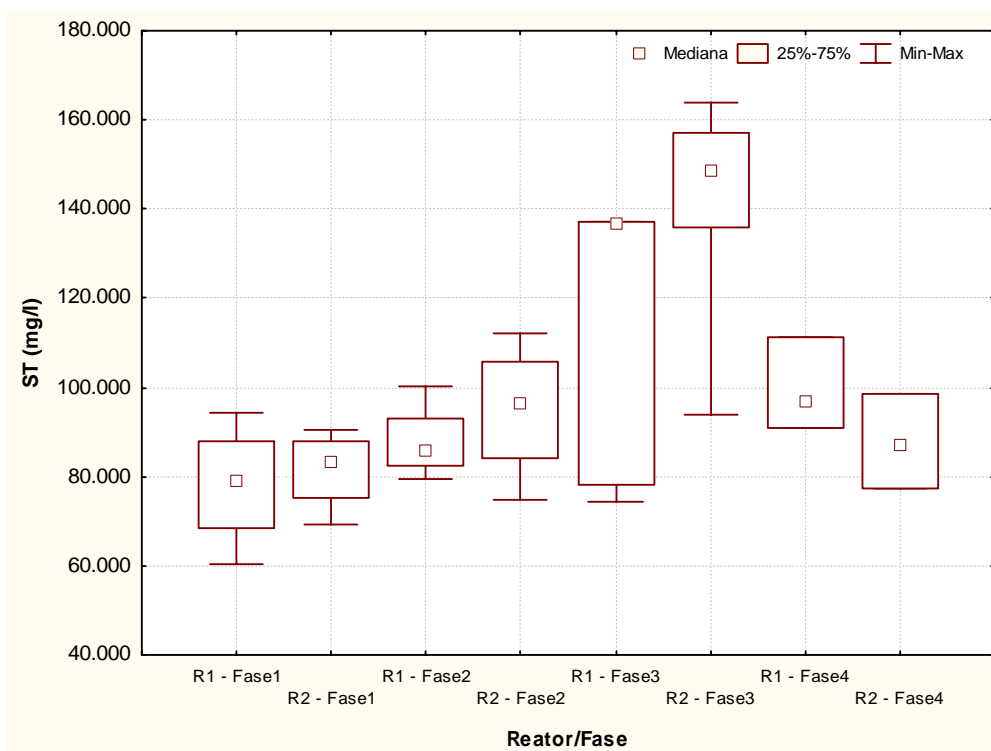


Figura 5.15 – Box-Whiskers dos ST da espuma do decantador para os reatores R1 e R2 em todas as fases

Pela releitura de todos os resultados dos parâmetros físico-químicos, organizados como gráficos Box-Whiskers, tem-se a mesma impressão fornecida pela análise inicial de diferenças entre médias das espumas de R1 e R2. Ou seja, nenhuma grande diferença entre os marcos de

variação dos parâmetros para os dois reatores se mostra expressiva e explicável para qualquer uma das fases.

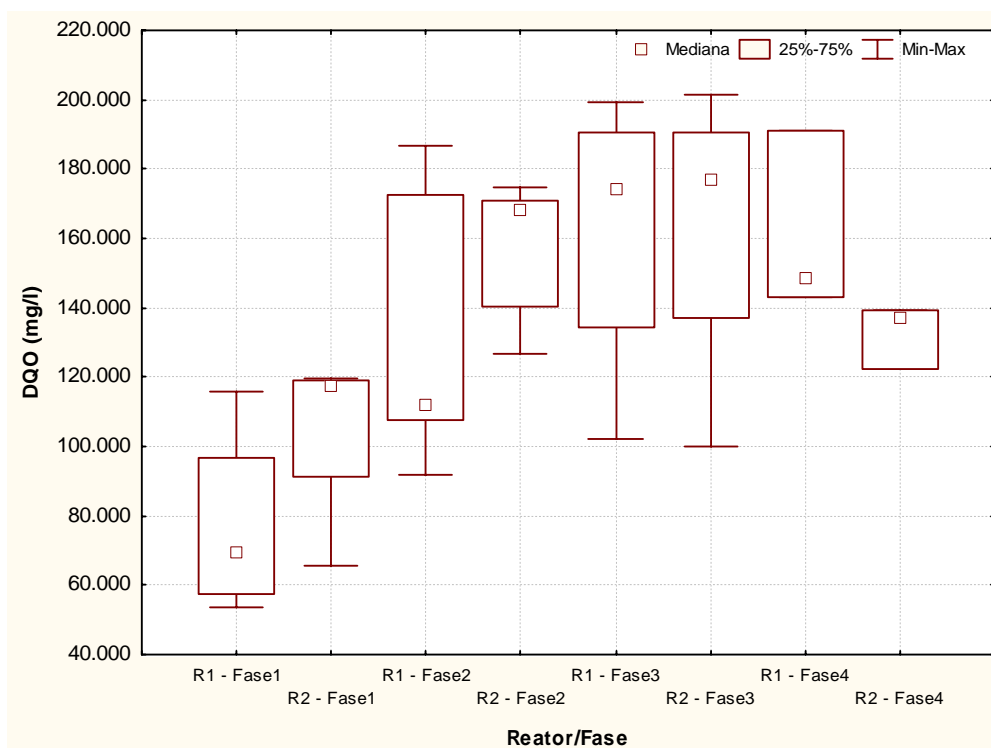


Figura 5.16 – Box-Whiskers da DQO da espuma do decantador para os reatores R1 e R2 em todas as fases

A Figura 5.17 retrata, para a DBO, que os marcos de variação entre as fases não delineiam tendências crescentes nem decrescentes, e, até mesmo, não evidenciam quaisquer diferenças patentes. Por outro lado, como já apresentado e discutido anteriormente, a DQO demonstrou um sentido de crescimento da fase 1 para a fase 3. Portanto, como a relação DQO/DBO informa sobre a biodegradabilidade aeróbia de resíduos, num sentido de que quanto maior a DQO relativamente à DBO menos o material é biodegradável aerobiamente e mais ele é recalcitrante, a espuma ao longo das fases, até a terceira, vai se tornando menos biodegradável.

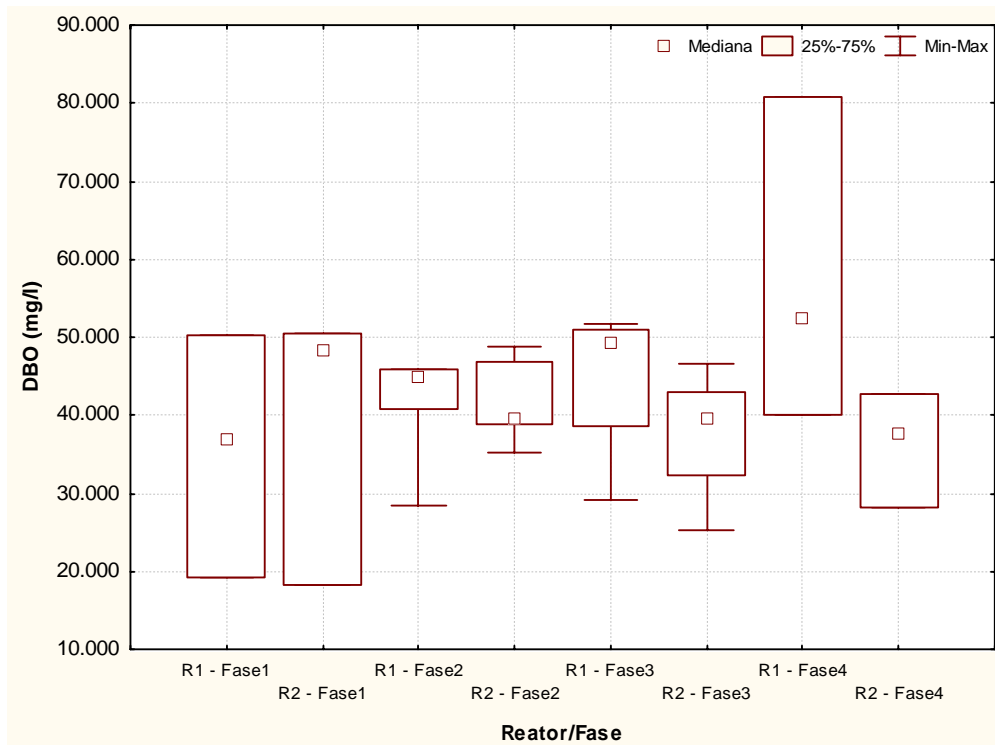


Figura 5.17 – Box-Whiskers da DBO da espuma do decantador para os reatores R1 e R2 em todas as fases

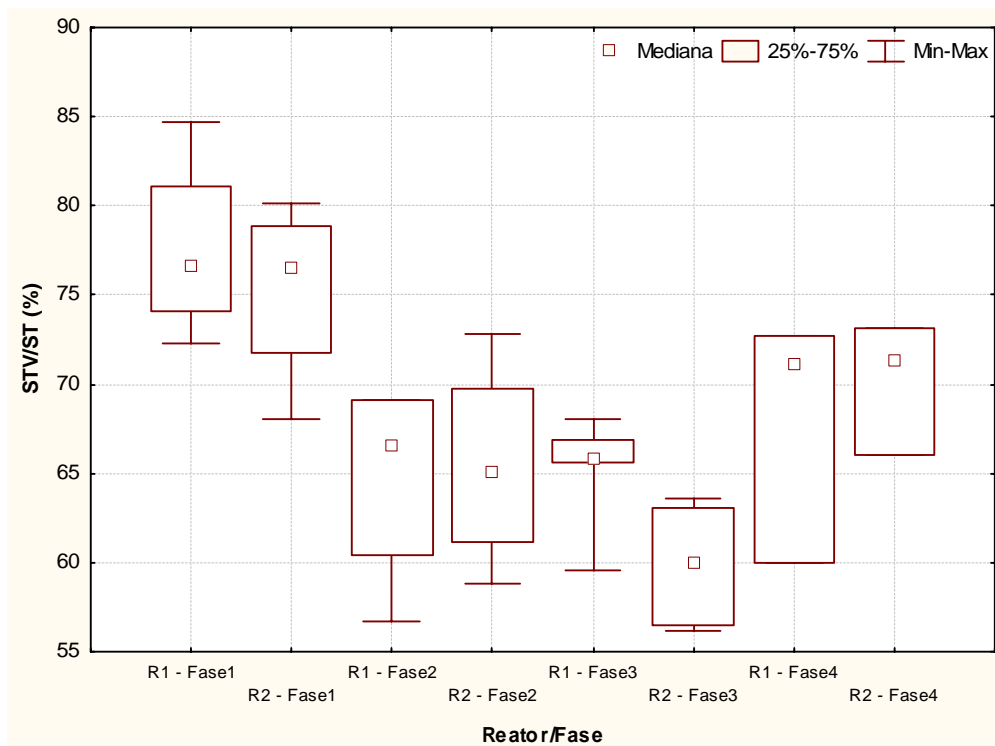


Figura 5.18 – Box-Whiskers dos STV/ST da espuma do decantador para os reatores R1 e R2 em todas as fases

A seu turno, a relação STV/ST das escumas, mostrada na Figura 5.18, teve a confirmação de evolução declinante no seu padrão de variação da fase 1 para a fase 3. Contudo, vale observar

que para o R1 as fases 2 e 3 não demonstram ser diferentes no que toca às variações do parâmetro. A seu turno, para o reator R2, a tendência de declínio é razoavelmente nítida da fase 2 para a 3, além de haver um incremento perceptível da fase 3 para a 4, resposta também avaliada para o reator R1. Portanto, apoiando-se nesses resultados, pode-se dizer que a espuma apresentou maior relação STV/ST para os maiores TDH e menores V_{asc} . ou, de outra forma, decréscimos no TDH e acréscimos na V_{asc} . do reator provocaram diminuição na relação STV/ST.

Na medida em que a relação STV/ST informa sobre a estabilidade dos sólidos presentes em resíduos e, por decorrência, do potencial de biodegradação de um material, tem-se que reduções dessa relação indicam indiretamente reduções na biodegradabilidade do resíduo. Dessa forma, os dois fatos mencionados, isto é, o aumento da relação DQO/DBO e diminuição da relação STV/ST, refletem a diminuição na biodegradabilidade do resíduo. A explicação para essa menor biodegradabilidade é pelo maior aporte de sólidos de mais difícil biodegradação à camada de espuma do decantador, em função de condições operacionais impostas, criadas essencialmente por menores TDH e maiores velocidades de ascensão do líquido.

Para as análises de matéria orgânica específica, a seu turno, houve algumas dificuldades de implementação, especialmente enfrentadas por ser a espuma uma “água residuária” muito concentrada. Assim, apesar de diversas análises terem sido efetivamente realizadas, muitos dos valores obtidos se mostraram visivelmente descartáveis. Todavia, conseguiu-se depurar os resultados e montar a Tabela 5.5, apenas contemplando as fases 2, 3 e 4, sendo que para a fase 2 somente um resultado está mostrado.

Os dados da Tabela 5.5 não revelam, em geral, diferenças muito pronunciadas entre as duas espumas em uma mesma fase. Mas, quando interpretadas as diferenças entre fases, nota-se que para a fase 3, aquela que tem os parâmetros operacionais mais extremos, há uma maior proporção de proteínas e lipídeos em relação aos carboidratos. Talvez este fato ajude a explicar o porquê do menor potencial de biodegradabilidade para espuma na fase 3.

Tabela 5.5 – Resultados de matéria orgânica específica da espuma do decantador dos reatores R1 e R2

| Fase | Parâmetro estatístico | Matéria orgânica específica (mg/l) | | | | | |
|------|-----------------------|------------------------------------|--------|------------------|--------|-----------------|--------|
| | | Carboidratos totais | | Proteínas totais | | Lipídeos totais | |
| | | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 2 | Média | 14.785 | 13.448 | 19.470 | 20.606 | 28.783 | 26.033 |
| | DP | - | - | - | - | - | - |
| | CV (%) | - | - | - | - | - | - |
| | N (un.) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | Média | 5.977 | 6.879 | 39.173 | 51.012 | 22.961 | 18.678 |
| | DP | 2.666 | 2.385 | 10.891 | 15.024 | 6.325 | 5.316 |
| | CV (%) | 45 | 35 | 28 | 29 | 28 | 28 |
| | N (un.) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | Média | 13.004 | 10.425 | 40.123 | 34.642 | 23.209 | 14.920 |
| | DP | 2.927 | 806 | 1.911 | 7.252 | 9.376 | 6.353 |
| | CV (%) | 23 | 8 | 5 | 21 | 40 | 43 |
| | N (un.) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

DP: desvio padrão

CV: coeficiente de variação

N: número de amostras

Por último, comparou-se, em caráter expedito, os valores somados de carboidratos, proteínas e lipídeos com a DQO total média para cada fase, considerando-se que a conversão desses constituintes a DQO tem sempre coeficiente maior que 1 g DQO/g do constituinte, por exemplo, 1,01 gDQO/gCarboidrato, 1,59 gDQO/gLipídeo e 1,55 gDQO/gProteína (Aquino *et al.*, no prelo). Assim, pode-se afirmar que os resultados sugerem que para espuma do decantador mais de 50 % da DQO é proveniente de carboidratos, proteínas e lipídeos somados.

5.4.2 Caracterização físico-química da espuma acumulada no decantador do reator R3 ao longo de tempo prolongado

Para a espuma do decantador do reator R3 foi formulada a hipótese de que haveria mudanças qualitativas, de ordem físico-química, desse material com o passar do tempo de sua acumulação. Eventualmente, os sólidos constituintes da camada de espuma poderiam sofrer processos físicos ou biológicos que alterassem suas propriedades qualitativas.

No entanto, o gráfico de pontos mostrado na Figura 5.19 contribui para negar a referida hipótese, na medida em que a variação ao longo da fase, para os parâmetros mostrados, é pequena. Assim, para ST houve variação de 102.000 a 123.000 mg/l, para DQO a variação foi de 152.000 a 188.000 mg/l e para DBO houve variação de 46.000 a 60.000 mg/l. Além disso, a relação STV/ST, não mostrada graficamente, revelou a mesma relativa constância, sendo

que das quatro análises desenvolvidas três resultaram no igual valor de 74 %, enquanto para apenas uma o valor foi de 70 %, ocorrido para a amostra da penúltima campanha de retirada.

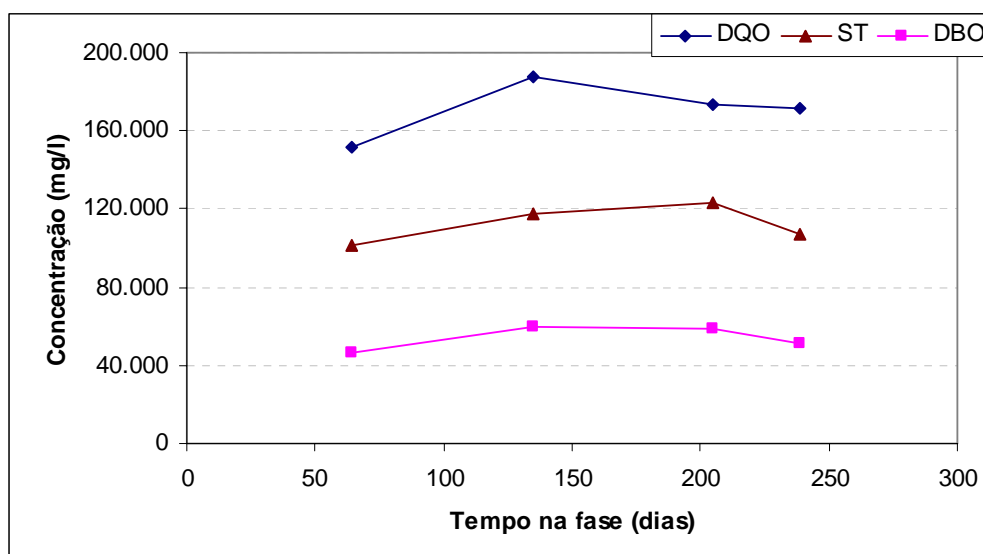


Figura 5.19 – Evolução temporal das características físico-químicas da espuma do decantador do reator R3

5.4.3 Caracterização físico-química da espuma acumulada no separador trifásico dos reatores UASB R1 e R2

A Tabela 5.6 contém todos os resultados das análises físico-químicas realizadas com as escumas formadas e acumuladas no interior dos separadores trifásicos, desde a fase 2. No primeiro procedimento de retirada, apenas análises de ST e STV foram obtidas.

Esses poucos resultados demonstram que tal espuma se apresentou mais diluída, com concentrações de todos os parâmetros bem inferiores às encontradas na espuma do decantador, especialmente para a espuma do R2. Também fica claro que a espuma do separador apresentou uma estabilização maior do que a da espuma do decantador, tanto pela menor relação STV/ST (valor máximo de 59 % contra uma menor média de 60 % para o decantador) quanto pela maior relação DQO/DBO (valor mínimo de 6,2 contra uma maior média de 4,2 para o decantador). Isto talvez se explique em função da biodegradação anaeróbia ser mais efetiva no interior do separador trifásico do que na superfície do decantador, favorecida pela agitação provocada pelo desprendimento de biogás, pelo maior contato com a biomassa e pelo maior tempo entre retiradas do material acumulado no interior do separador.

Tabela 5.6 – Características físico-químicas da espuma do interior do separador trifásico

| Retirada | DBO (mg/l) | | DQO(mg/l) | | ST(mg/l) | | STV/ST(%) | |
|-----------|------------|-----|-----------|------|----------|-------|-----------|----|
| | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 1ª Fase 2 | - | - | - | - | 24700 | 13600 | 34 | 57 |
| 2ª Fase 2 | 585 | 390 | 4051 | 2409 | 3200 | 2700 | 47 | 59 |
| Fase 3 | 1395 | 765 | 8980 | 7211 | 10425 | 5868 | 53 | 57 |
| Fase 4 | 1200 | 281 | 9305 | 2115 | 9440 | 1881 | 58 | 48 |

As diferenças de constituição que ficaram evidenciadas pelos resultados da Tabela 5.6 somente foram verificadas e consistidas a favor da menor concentração do material do R2 relativamente à do R1. Possivelmente a maior atividade metabólica desenvolvida no reator que recebe o esgoto com partículas de menores tamanhos, determina não só menos acumulação como também menos concentração para a espuma. Este fato teria supostamente relação com uma melhor mistura na zona de desprendimento de gases, o que faria com que a dispersão dos sólidos na massa líquida fosse maior.

5.4.4 Interferência dos sólidos da espuma do decantador com a qualidade do efluente final

5.4.4.1 Previsão da influência da espuma dos reatores R1, R2 e R3 se não houvesse retenção

Uma situação possível e utilizada em projetos de reatores UASB, que não foi adotada em nenhuma das unidades investigadas, é aquela relacionada com a não retenção da espuma na superfície do decantador. Essa possibilidade operacional foi simulada e, para tanto, calculou-se o incremento de DQO e SST que as camadas de espuma imputariam sobre o efluente se os seus sólidos não ficassem acumulados no reator. Organizaram-se os resultados encontrados na forma da Tabela 5.7, a qual expõe valores médios por fase de cada reator.

A Tabela 5.7, de uma forma geral, revela valores reduzidos como incrementos aos parâmetros de qualidade dos efluentes no que toca à DQO e SST, a não ser para as espumas dos reatores R1 e R2 na fase 3. Esse caráter reduzido dos dados encontrados tem respaldo nas concentrações normalmente verificadas nos efluentes dos reatores pesquisados, as quais podem ser consideradas, de maneira generalizada e na média, em torno de 150 mg/l para DQO e 60 mg/l para SST.

Tabela 5.7 – Resultados da hipotética influência dos sólidos da espuma sobre a qualidade do efluente

| Escuma investigada/Fase | | Qualidade do efluente influenciada pela espuma | |
|-------------------------|------------|--|--------------------------|
| | | Incremento de DQO (mg/l) | Incremento de SST (mg/l) |
| Escuma R1 | Fase 1 | 0,3 | 0,3 |
| | Fase 2 | 1,8 | 1,2 |
| | Fase 3 | 11,6 | 7,8 |
| | Fase 4 | 1,8 | 1,1 |
| Escuma R2 | Fase 1 | 0,4 | 0,3 |
| | Fase 2 | 1,6 | 1,0 |
| | Fase 3 | 27,7 | 24,2 |
| | Fase 4 | 3,0 | 2,0 |
| Escuma R3 | Fase única | 1,2 | 0,8 |

Assim sendo, a título de exemplificação, para a fase 2 e reator R1, a influência dos sólidos da espuma sobre o efluente pioraria cerca de 1,2 % e 2,0 % a qualidade do efluente, respectivamente, para DQO e SST. Com isso, confirma-se o verificado por Van Haandel e Lettinga (1994), em Kampur na Índia, quando um reator com retentor de espuma no decantador melhorou apenas marginalmente a qualidade do efluente, em comparação com outro reator sem o retentor.

Fica também evidenciada pelos dados apontados, uma concordância plena com a evolução dos coeficientes de acumulação da espuma no decantador entre as fases. Assim, a influência incremental da espuma na DQO e nos SST efluentes seguiria uma progressão crescente entre as fases, com a aproximação do limite de sobrecarga, isto é, da fase 1 para a 3, quando o TDH reduz de 9 para 5 horas e a velocidade ascensional aumenta de 0,5 para 1,1 m/h. Nesse sentido, na fase 3, o incremento de DQO e SST no efluente atingiria valores bastante apreciáveis, representado uma piora expressiva da qualidade do efluente gerado, especialmente para o reator R2, com o peneiramento em antecedência. Esta constatação experimental foi hipotetizada a partir da referência de Van Haandel e Lettinga (1994), isto é, a importância da retenção de espuma se evidenciaria em TDH mais curtos.

O retorno a parâmetros operacionais mais folgados na fase 4 tendeu à diminuição dos efeitos dessa simulada condição, quer dizer, de um reator não dotado do retentor de espuma no decantador, no sentido de retornar com valores de DQO e SST da ordem das primeiras fases. Por sua vez, para o reator R3, a influência da não retenção da espuma sobre a qualidade do efluente seria também muito baixa.

5.4.4.2 Influência da espuma do reator R3 mesmo com retenção

Outra hipótese a ser testada neste trabalho foi a de que, com a permanência por tempo prolongado de uma camada de espuma na superfície do reator, haveria progressivamente maior influência de sólidos da espuma sobre a qualidade do efluente à medida que o tempo de acumulação fosse avançando. Isso porque a camada de espuma se espessaria e envelheceria, se aproximando da saída do efluente, nesse caso, subsuperficial.

Contudo, essa expectativa não foi confirmada pelos resultados de qualidade do efluente do reator R3. Primeiramente, têm-se os resultados de DQO particulada efluente do reator, mostrados na Figura 5.20, os quais, por meio de uma regressão linear, revelam uma desprezível tendência de crescimento, transparecida pelo ínfimo coeficiente de determinação (1%). Na seqüência, o gráfico exposto na Figura 5.21, para a progressão dos SST no tempo prolongado de acumulação da camada de espuma, vem informar que, em verdade, houve um relativo maior decréscimo na concentração de sólidos efluentes, com coeficiente de determinação de 11%.

De fato, os resultados discutidos no item 5.3.2 não atestam que tenha havido um grande avolumamento da camada de espuma, durante o período avaliado. Inclusive, com ocorrência de diminuição na taxa de acúmulo, após descarte de lodo, e também de redução no volume de espuma acumulado, depois da ocorrência de chuva forte. Não obstante, para o período que vai do início do monitoramento até 135 dias depois, houve uma evolução crescente no coeficiente de acumulação. Mesmo assim, em momento algum, seja no início ou no final do período avaliado, houve qualquer grande tendência de acréscimo ou decréscimo na qualidade do efluente final.

Portanto, conclui-se pelos resultados que aparentemente uma camada de espuma deixada por tempo mais prolongado na superfície do decantador não refletiria em prejuízos evidentes para a qualidade do efluente.

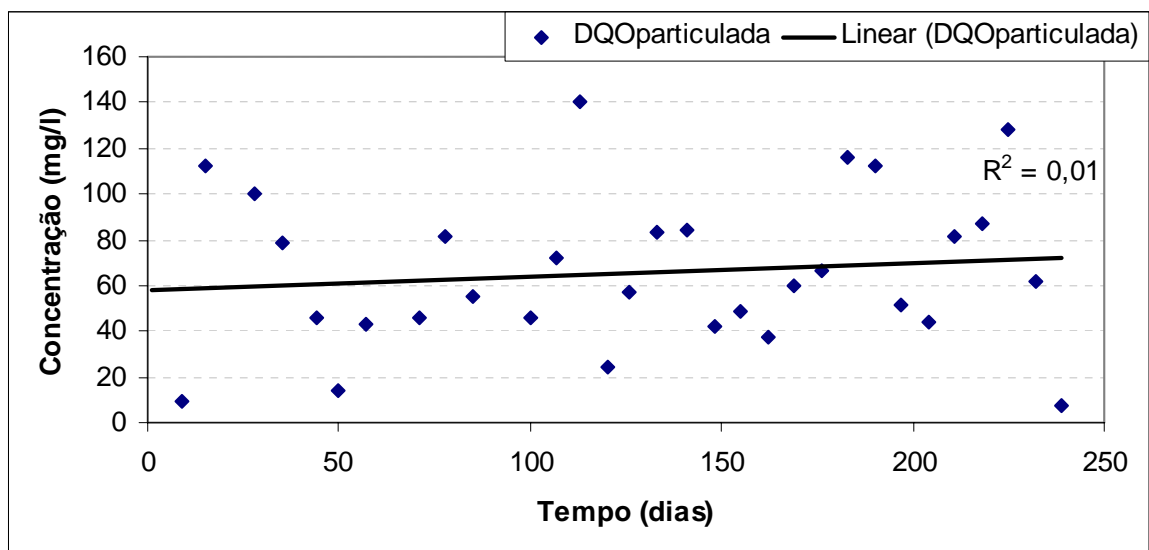


Figura 5.20 – Evolução temporal e ajuste da DQO particulada efluente ao reator R3

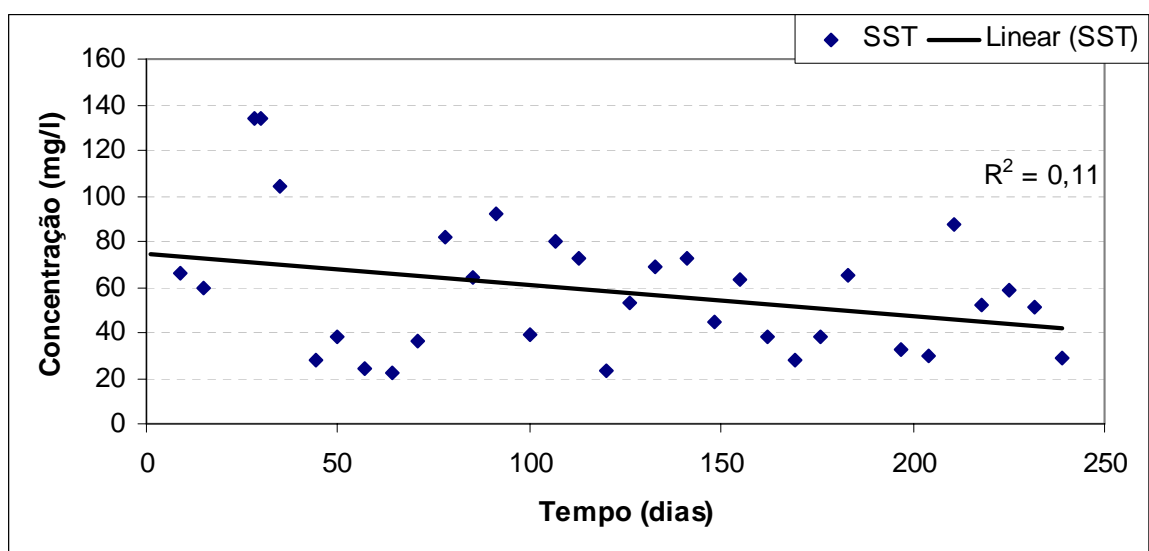


Figura 5.21 – Evolução temporal e ajuste dos SST efluentes ao reator R3

5.5 Fração biodegradada da espuma acumulada nos reatores UASB

Vários testes de fração biodegradada foram desenvolvidos, contemplando todas as espumas amostradas. No entanto, como as espumas do interior do separador trifásico foram de características bastante distintas das outras do decantador e do que se esperava como amostra de espuma, isto é, apresentando-se muito diluída, os testes de fração biodegradada aeróbia e anaeróbia para as mesmas não tiveram sucesso. Portanto, este item de fração biodegradada da espuma dos reatores UASB apresenta os resultados sobre as amostras de espumas do decantador dos reatores R1, R2 e R3.

5.5.1 Fração biodegradada aeróbiamente para espuma do decantador dos reatores UASB R1 e R2

Dos testes de fração biodegradada aeróbiamente realizados, um para cada fase foram aproveitados e organizados. Os resultados são mostrados no gráfico de barras da Figura 5.22, em que se vê para cada duração das incubações, para cada fase operacional e, por fim, para cada espuma, o valor da fração biodegradada aeróbiamente atingida, isto é, o percentual de DQO degradada.

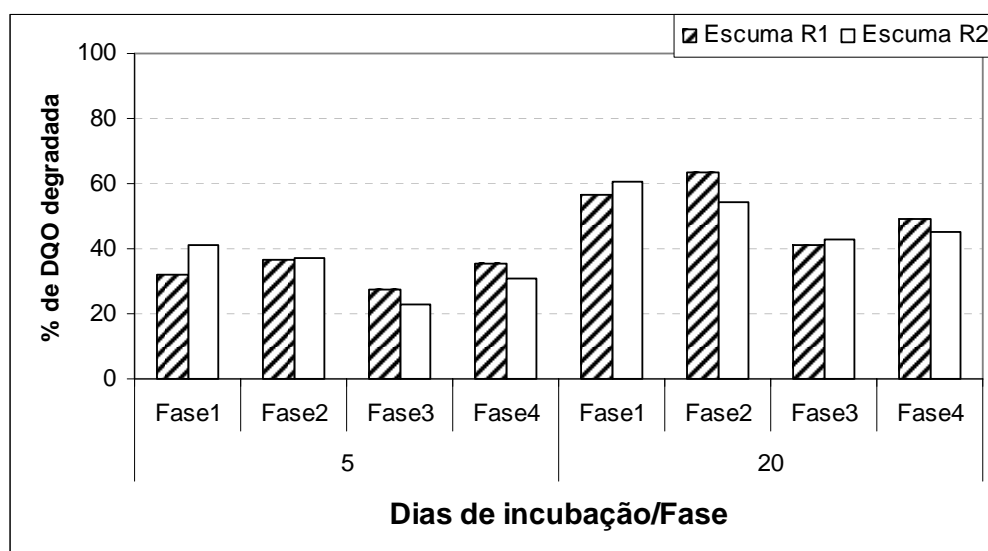


Figura 5.22 – Fração biodegradada aeróbiamente da espuma do decantador dos reatores R1 e R2 em todas as fases operacionais

A visualização de cada conjunto de duas barras próximas, uma relativa a cada reator, permite que se conclua que não há qualquer diferença considerável entre as espumas acumuladas nos

dois decantadores. Assim, esses resultados dão a entender que o peneiramento forçado antecedendo ao reator R2, também, não impõe mudanças nesse parâmetro qualitativo.

Atenta-se para que o percentual de DQO biodegradada aerobiamente para as duas escumas evoluiu das duas primeiras fases para a terceira em decréscimo, tanto no curto como no longo prazo. A progressão de diminuição da biodegradação entre as fases de 1 a 3 fica melhor patenteada para a espuma do reator R2. Para essa espuma a fração biodegradada foi, de fato, diminuindo com a mudança da fase 1 para a 2 e desta para a 3. Tais fatos vêm reforçar a hipótese de que mais sólidos de difícil biodegradação estariam aportando à camada de espuma, na medida em que o TDH global dos reatores diminui e a velocidade ascensional aumenta.

Por sua vez, a instauração da fase 4 demonstrou influenciar na perceptível tendência de elevação na biodegradação aeróbia da espuma dos decantadores. Com seus parâmetros operacionais, em grande parte, idênticos aos da fase 1 e já mais distantes dos limites de sobrecarga hidráulica aproximados pela fase 3, houve uma perspectiva de retorno para os relativos maiores valores de fração biodegradada ocorridos nas primeiras fases operacionais.

5.5.2 Fração biodegradada anaerobiamente para espuma do decantador dos reatores UASB R1 e R2

5.5.2.1 Os testes iniciais

As primeiras tentativas de realização dos testes de fração biodegradada anaerobiamente não foram de grande sucesso do ponto de vista de seu aproveitamento como resultados da investigação em questão, contudo permitiram o acerto da metodologia para a consecução das análises posteriores. Portanto, melhoramentos quanto à composição da solução de nutrientes, quanto aos volumes do líquido e espaço gasoso do frasco de reação e, também, quanto à concentração inicial de DQO na batelada, foram empreendidos.

Os testes que permitiram os referidos aprimoramentos foram o único teste desenvolvido na fase 1 e um outro desenvolvido mais no início da fase 2, além de outras tentativas, abortadas antes de completado o teste. Assim, para a fase 1 nenhum teste pôde representar corretamente a biodegradação do material retirado. A seu turno, como mais ao final da fase 2 outro teste foi desenvolvido de acordo com a metodologia acertada, esta fase teve uma avaliação de fração biodegradada anaerobiamente que a representasse.

De fato, o primeiro teste, desenvolvido na fase 1, apresentou uma fração biodegradada anaerobiamente desprezível para as escumas dos reatores R1 e R2, sendo desta feita usada uma composição de solução nutriente que não incluía alguns importantes elementos, como Cálcio, Magnésio e Níquel. Por sua vez, no primeiro teste da fase 2, já com a implementação da solução nutritiva modificada, ainda não havia sido acertada a concentração inicial de DQO na batelada, assim como a colocação de bicarbonato de sódio como suprimento da alcalinidade do meio.

Portanto, acredita-se que o fundamental para a correção do teste, a partir do segundo da fase 2, foi a limitação da concentração da DQO estimada como biodegradável a cerca de 2.000 mg/l, por meio de diluição do substrato concentrado, e o suprimento da alcalinidade bicarbonato a fim de garantir o tamponamento do meio de reação. Com isso, garantiu-se que não haveria sobrecarga orgânica insustentável, a provável motivadora das inibições verificadas nos testes iniciais.

Além disso, os volumes da batelada e do espaço gasoso passaram a ser divididos igualmente, enquanto antes o volume era maior para a batelada. Essa medida foi tomada a fim de se evitar as vivenciadas pressões excessivas de biogás produzido em um mais reduzido espaço gasoso de cabeça (*headspace*).

5.5.2.2 Os testes padronizados

Depois de vencido o período de melhoramentos experimentais para o teste de fração biodegradada anaerobiamente, seguiram-se os testes em cada fase, os quais redundaram em valores observáveis através de Figura 5.23, em gráfico de barras. Novamente diferenças entre as escumas dos reatores R1 e R2 não se evidenciaram, em mais uma negativa à influência do peneiramento forçado sobre as características qualitativas da espuma.

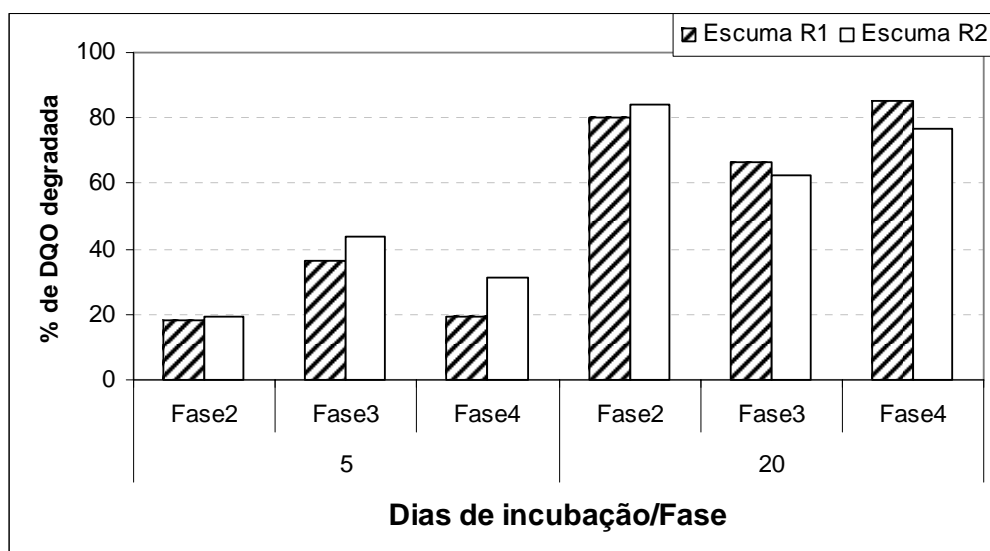


Figura 5.23 – Fração biodegradada anaerobiamente da espuma do decantador dos reatores R1 e R2

A comparação dos percentuais de fração biodegradada entre fases permitiu constatar alguma diferença entre as fases 2 e 4 relativamente à fase 3, isto é, as fases 2 e 4 seriam, em geral, semelhantes entre si e diferentes conjuntamente da fase 3, tanto para curto quanto para longo prazos. Pela Figura 5.23, as fases 2 e 4 revelaram uma grande distância entre o curto e longo prazo de fração biodegradada, alcançando um fator de cerca de 4 vezes, com a exceção da espuma do R2 para a fase 4 que diminui um pouco esse valor para cerca de 2,5 vezes. A seu turno, na fase 3 há uma aproximação entre esses dois marcos de biodegradação, seja pela elevação do marco inferior ou diminuição do marco superior, relativamente às ordenadas das fases 2 e 4.

Com isso, na fase 3, a fração biodegradada anaerobiamente de curto prazo se mostrou maior que para as outras duas fases e a de longo prazo se mostrou menor. Tal biodegradação menor no longo prazo corrobora a hipótese de que nessa fase operacional os sólidos da espuma estariam constituídos por mais materiais de mais difícil biodegradação como função do menor TDH e maior velocidade ascensional aplicados. Contudo, a maior fração biodegradada de curto prazo não contribui com essa hipótese.

5.5.3 Fração biodegradada para espuma do decantador do reator UASB R3 ao longo de tempo prolongado

Os resultados dos testes de fração biodegradada aeróbia e anaeróbia a partir das amostras da espuma do decantador do reator R3, no decorrer do prolongado tempo de mais de 7 meses, permitiram a sistematização dos dados na forma da Figura 5.24, em gráfico de série temporal.

Os resultados permitem constatar que os valores de fração biodegradada aeróbia de 5 e 20 dias são mais próximos entre si, em comparação aos correspondentes para fração biodegradada anaeróbia. Tal informação sugere que a grande parte do caráter de biodegradação aeróbia das partículas da espuma seja consumido em curto prazo (5 dias) e apenas um adicional, pouco mais que 1/3, se acrescente até o prazo de 20 dias. A seu turno, a fração biodegradada anaeróbia de 5 dias foi até mais reduzida do que 1/4 da biodegradação de 20 dias.

Esses resultados se aproximam bem daqueles para as frações biodegradadas aeróbia e anaeróbia da espuma do reator R1 para a fase operacional 4, para qual os parâmetros TDH, V_{asc} e área de influência dos tubos distribuidores (AITD) são bastante semelhantes daqueles verificados para toda a operação do reator R3.

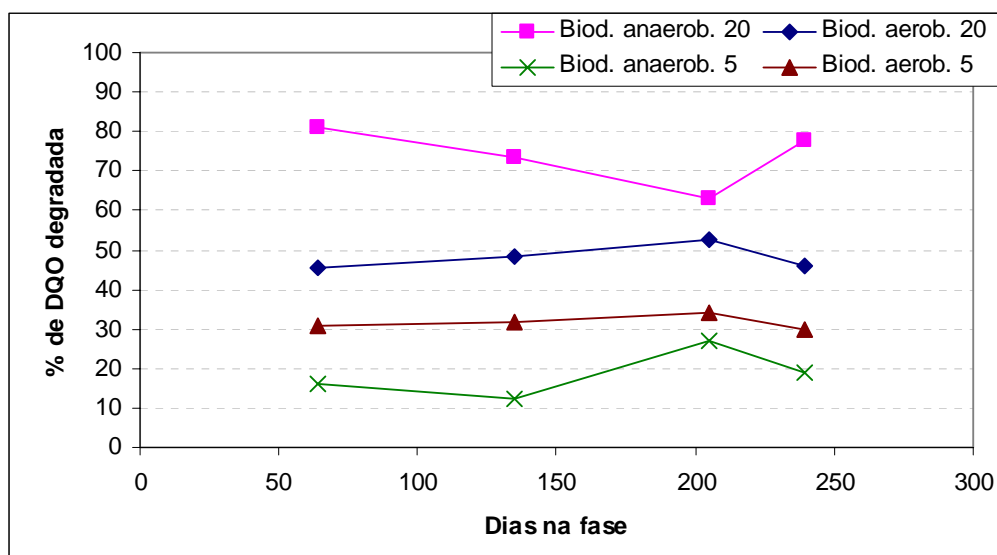


Figura 5.24 – Evolução temporal das frações biodegradadas aeróbia e anaeróbia da espuma do decantador do reator R3

Por sua vez, as informações reveladas por meio da espuma do reator R3 que mais importam são sobre as variações temporais desse parâmetro qualitativo ora avaliado. Assim sendo, nota-se que algumas diferenças explicáveis, ao longo do período de monitoramento, se manifestam para as frações biodegradadas de longo prazo. Verifica-se que a fração biodegradada aerobiamente tende a um ligeiro crescimento e a fração biodegradada anaerobiamente tende contudentemente a um decréscimo, ambas, desde o dia 64 ao dia 205 de manutenção da camada de espuma na superfície do decantador. Na seqüência, não obstante terem se passado apenas mais 34 dias, atingido os 239 dias de acompanhamento, os valores de fração biodegradada aerobia e anaerobiamente retornam, quase identicamente, aos iniciais. O evento de precipitação forte, registrado nesse ínterim, provavelmente seja o fator causal dessa alteração qualitativa repentina.

Dessa forma, o efeito da chuva excessivamente forte sobre a camada possivelmente foi o de provocar uma decomposição generalizada da espuma acumulada, desconstituindo a trama formada e perdendo-se boa parte dos sólidos retidos durante o tempo prolongado do estudo. A partir desse efeito natural, a camada teria parcialmente se reconstituído até o dia da última amostragem, entretanto, agora com uma maior percentagem de partículas novas em relação às velhas, que foram em boa parte perdidas. Com isso, a característica de biodegradação do material haveria realmente de se aproximar da de uma espuma mais recentemente formada, tal qual a espuma coletada inicialmente, aos 64 dias.

Por fim, aventa-se uma possível explicação para a tendência de redução na fração biodegradada anaerobiamente com o passar do tempo na fase. Poderia ser motivada por efeito de estabilização biológica “*in locu*”, o que teria provocado uma diminuição da possibilidade de biodegradação adicional dos sólidos que permaneceram mais tempo na camada de espuma.

5.6 Caracterização cromatográfica da espuma acumulada nos reatores UASB

5.6.1 Caracterização cromatográfica da espuma do decantador dos reatores R1 e R2

De forma geral, os cromatogramas apresentados nas Figura 5.25 a 5.29 mostram que grande parte dos compostos detectados nas amostras da camada de espuma não foram detectados no esgoto afluente aos reatores. Esses resultados indicam que a concentração de tais compostos no afluente deve ser muito baixa, menor do que o limite de detecção do método, e confirmam

a hipótese de que a camada de espuma concentra materiais hidrofóbicos e de baixa densidade, como óleos e graxas. Embora a análise cromatográfica feita seja apenas qualitativa, e não permita a identificação dos compostos detectados, suspeita-se, com base no solvente de extração utilizado e nas propriedades da coluna cromatográfica, que a maioria dos picos detectados sejam componentes de óleos tanto vegetais quanto minerais.

As Figuras 5.25 a 5.29 mostram ainda que os cromatogramas das amostras de espuma coletas em diferentes ocasiões foram semelhantes. De fato, isso foi observado quando outros solventes (hexano, MTBE) e outros métodos cromatográficos foram testados. Esses resultados indicam que a composição química da espuma, analisada em termos de compostos extraídos pelo acetato de etila, é bem definida e não mudou expressivamente entre os dois momentos de amostragem, um ocorrido no final da fase 4 e o outro, em seqüência, no início da fase 5 (esta fase não fez parte do monitoramento para as demais investigações desse estudo).

Os cromatogramas também mostram que os picos detectados entre 45 e 50 minutos nas amostras de espuma foram, para as distintas coletas, mais intensos para a espuma do reator R2 quando comparados com os da espuma do reator R1. Tais resultados indicam que a concentração dos compostos hidrofóbicos presentes (extraídos com acetato de etila) era maior na espuma do reator R2 do que na espuma do R1. O programa de temperatura do forno foi tal que a temperatura permaneceu a 110 °C pelos 10 minutos iniciais da corrida, aumentando até 300 °C na taxa de 5 °C por minuto. Dessa forma, os compostos constituintes da espuma que começaram a ser eluídos a partir dos 25 minutos têm pontos de ebulição maiores do que 180 °C. Os compostos presentes em concentrações maiores na espuma do reator R2, e eluídos entre 45 a 55 minutos, têm pontos de ebulição que variam de 280 a 300 °C

Os cromatogramas permitem ainda afirmar que a maioria dos compostos orgânicos detectados nas amostras de espuma não está presente nos efluentes. Alguns compostos, como, por exemplo, o composto eluído a aproximadamente 46 minutos foram detectados no afluente, efluente e espuma, mas a concentração no efluente é menor que no afluente, e insignificante quando comparada com a espuma.

As amostras contendo os orgânicos extraídos da espuma estão preservadas e serão utilizadas para identificação dos compostos detectados. A identificação dos principais constituintes extraídos da espuma, além de permitir a sua quantificação, possibilitaria ainda avaliar a sua origem.

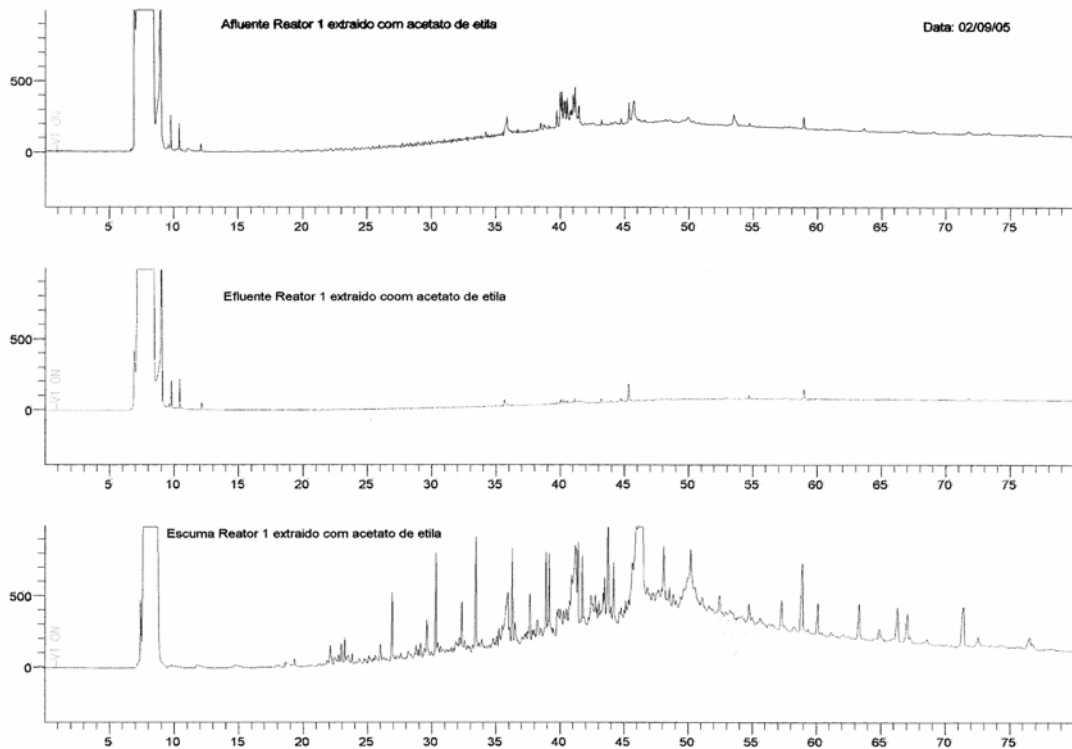


Figura 5.25 – Cromatogramas do afluente, efluente e escuma do decantador do reator R1. Extração com Acetato de Etila em pH = 7, coleta feita em 02/09/05

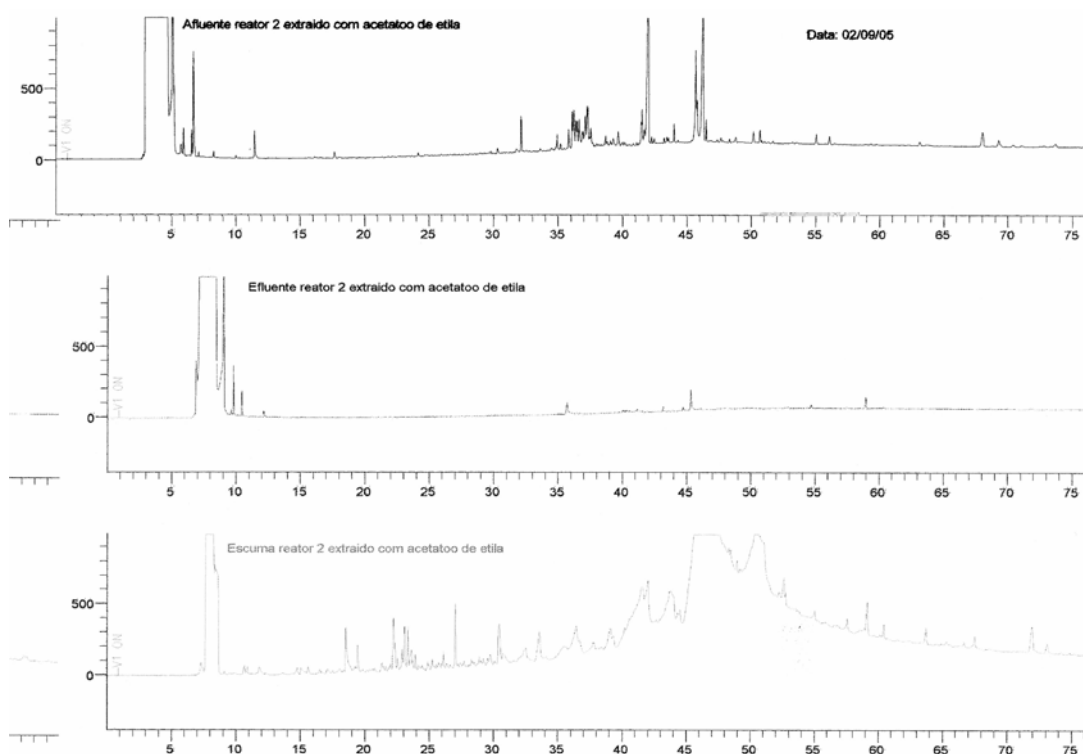


Figura 5.26 – Cromatogramas do afluente, efluente e escuma do decantador do reator R2. Extração com Acetato de Etila em pH = 7, coleta feita em 02/09/05

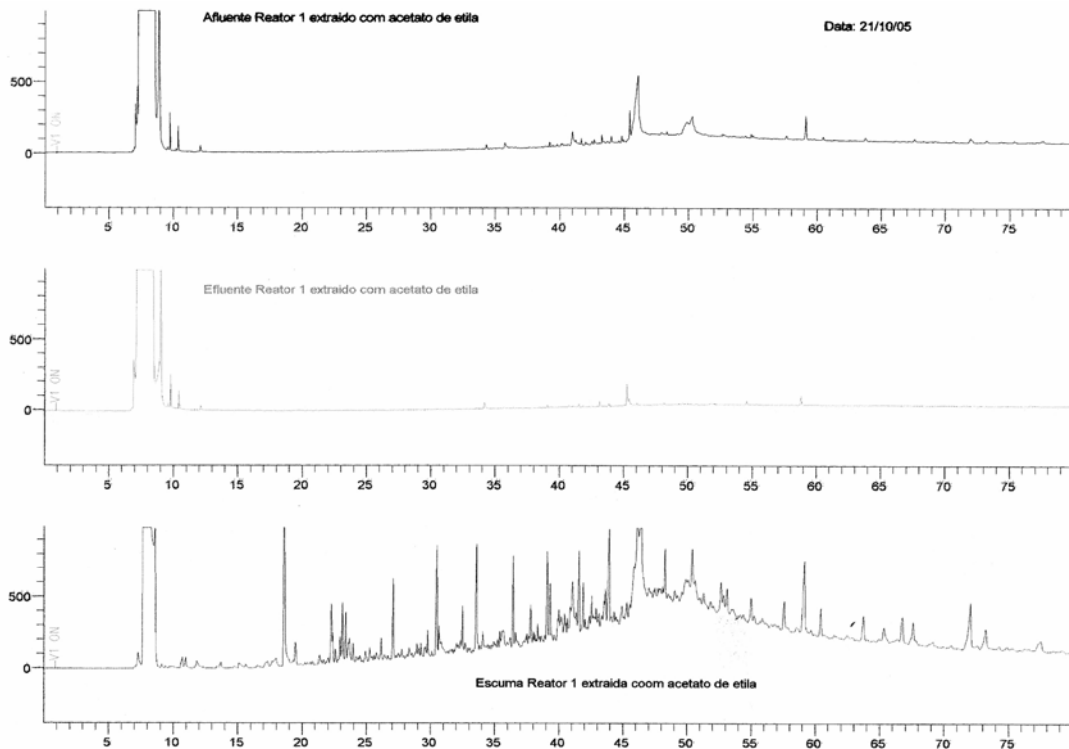


Figura 5.27 – Cromatogramas do afluente, efluente e escuma do decantador do reator R1. Extração com Acetato de Etila em pH = 7, coleta feita em 21/10/05

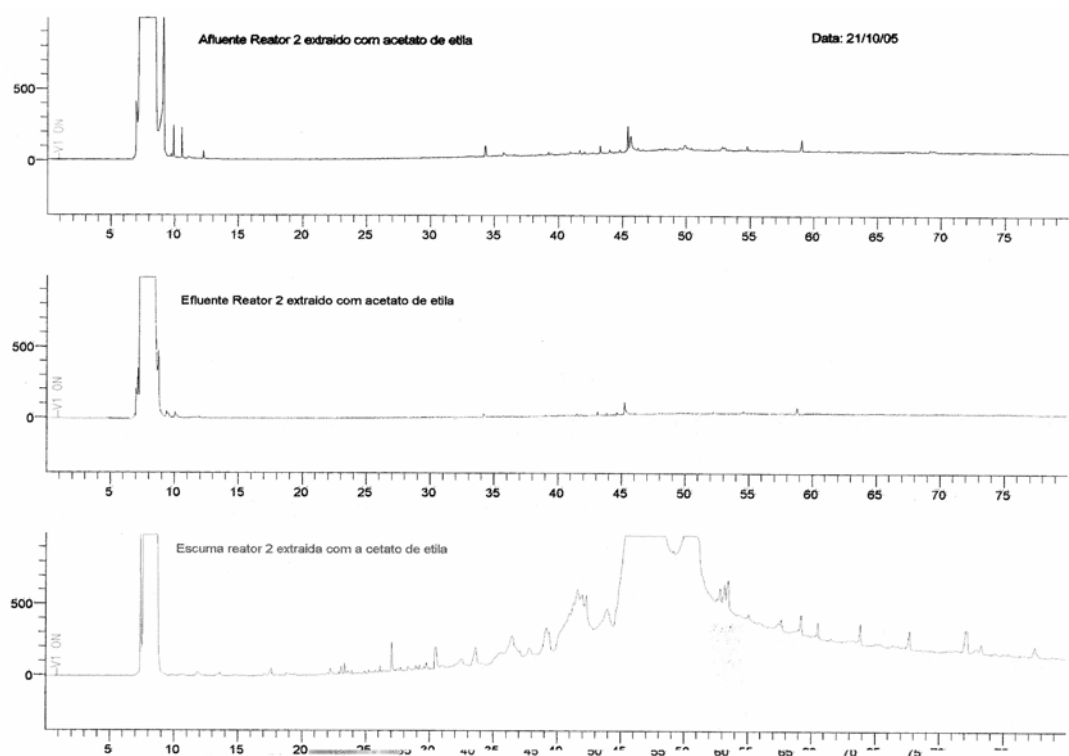


Figura 5.28 – Cromatogramas do afluente, efluente e escuma do decantador do reator R2. Extração com Acetato de Etila em pH = 7, coleta feita em 21/10/05

5.7 Caracterização microbiológica da espuma acumulada nos decantadores dos reatores UASB

Durante as coletas para as análises microbiológicas, sob uma avaliação visual, foram observados dois tipos distintos de coloração superficial para a camada de espuma: espuma de superfície esverdeada e espuma de superfície acinzentada.

5.7.1 Caracterização microbiológica da espuma de superfície esverdeada

Para os decantadores dos reatores UASB R1 e R2 esse tipo de coloração predominante se verificou somente nos decantadores no início da primeira fase experimental (fase 1). Para o reator UASB R3 a coloração esverdeada foi verificada durante praticamente todo o tempo de permanência da camada no reator, bastante generalizadamente na superfície inteira.

Essa espuma apresentou uma grande quantidade de sólidos sobre os quais sustenta-se um biofilme de coloração esverdeada. A visualização microscópica das amostras dos três reatores revelou a presença de muitos microrganismos filamentosos, longos e entrelaçados, constituindo uma matriz biológica que provavelmente contribui para a formação compacta da espuma (Figura 5.29a). A coloração azul-esverdeada e o movimento oscilatório lento indicam que um tipo de filamento pertence ao grupo das cianobactérias, provavelmente do gênero *Oscillatoria* (Anagnostidis e Komárek, 1988). Foi observado que alguns desses filamentos contém pequenas estruturas internas podendo ser gotas de óleo, grânulos de proteína ou pseudo-vacúolos para acúmulo de gás. O acúmulo de gás, característico de células mais velhas, contribui para a floração das cianobactérias, pois diminui sua densidade podendo dar origem à formação de verdadeiras massas ou ilhas flutuantes como observadas nas amostras (Anagnostidis e Komárek, 1988).

Além dos filamentos de cianobactérias, foram observados microrganismos unicelulares de coloração esverdeada nas amostras de espuma dos três reatores (Figura 5.29b). Um tipo morfológico apresentou características muito semelhantes àquelas descritas para algas do gênero *Chlamydomonas*: células esféricas, rígidas, dois flagelos polares de mesmo tamanho e mancha ocelar, um órgão fotossensível de coloração vermelha com função de orientar o microrganismo na procura da luz (Anagnostidis e Komárek, 1988). Um outro grupo também apresentou mancha ocelar, porém, com células maiores, alongadas e flexíveis, mudando constantemente de forma, características típicas de membros do gênero *Euglena*

(Anagnostidis e Komárek, 1988). Uma espécie de diatomácea alongada (Figura 5.29c) foi observada constantemente nas amostras. Sabe-se que as diatomáceas acumulam gotas de óleo no interior das células permitindo que se movimentem verticalmente ocupando diferentes regiões no decantador.

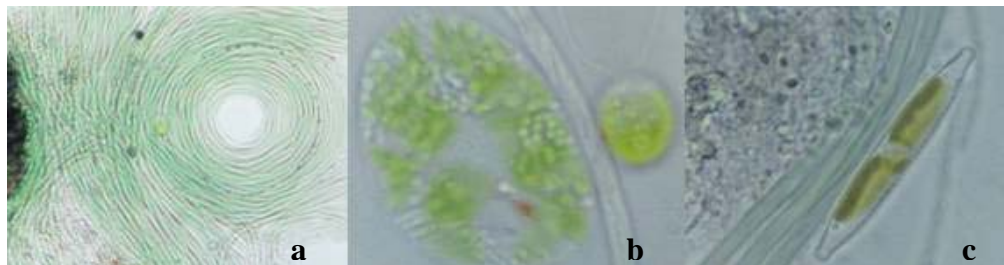


Figura 5.29 – Microscopia de campo claro da espuma esverdeada. (a) filamentos de cianobactérias, aumento 400x. (b) microrganismos flagelados similares aos gêneros *Chlamydomonas* (célula menor) e *Euglena* (célula maior), aumento de 1000x. (c) diatomáceas com cloroplasto marrom, aumento 1000x.

Dentre as várias morfologias bacterianas freqüentemente observadas na espuma de coloração esverdeada, destacou-se a presença de longos filamentos com grânulos internos e de movimento deslizante, muito semelhante ao gênero *Beggiatoa* do grupo das bactérias incolores do enxofre (Figura 5.30a). Este gênero bacteriano ocorre comumente em ambientes com elevadas concentrações de sulfeto, e utilizam este composto como fonte de elétrons durante a respiração aeróbia, acumulando internamente o sulfeto oxidado na forma de enxofre molecular (Larkin e Strohl, 1983). Os filamentos semelhantes a *Beggiatoa* foram freqüentemente visualizados na superfície externa da espuma, associados aos filamentos da cianobactéria *Oscillatoria* provavelmente para se beneficiar do oxigênio produzido durante a atividade fotossintética da cianobactéria. Tal associação seria uma vantagem para que a *Beggiatoa* realize seu metabolismo respiratório aeróbio em um ambiente com baixa concentração de oxigênio dissolvido (aproximadamente 0,30 mg O₂/L na superfície do decantador). Nesta condição, a oxidação do sulfeto ocorre parcialmente, sendo enxofre elementar o produto final da reação, o qual é acumulado em forma de grânulos intracelulares. Uma vez que grânulos intracelulares foram observados, acredita-se que o tipo morfológico semelhante à *Beggiatoa* esteja realizando a oxidação parcial do sulfeto.

Também foram observados bacilos grandes, móveis, espiralados, com grânulos internos, predominantemente localizados no interior da espuma, cuja morfologia se assemelha à de bactérias do enxofre do gênero *Thiospirillum* (Figura 5.30b). Este grupo bacteriano usa o H₂S como doador de elétrons para a redução do CO₂ na fotossíntese, e acumula internamente

enxofre elementar em forma de grânulos. Estas bactérias são típicas de ambientes iluminados, ricos em sulfeto e com baixo teor de oxigênio (Madigan *et al.* 2003), condições semelhantes às encontradas na superfície do decantador. Outras morfologias microbianas também foram visualizadas, tais como cocos, bacilos retos e bacilos espiralados, algumas vezes formando aglomerados celulares, como apresentado na Figura 5.30c.

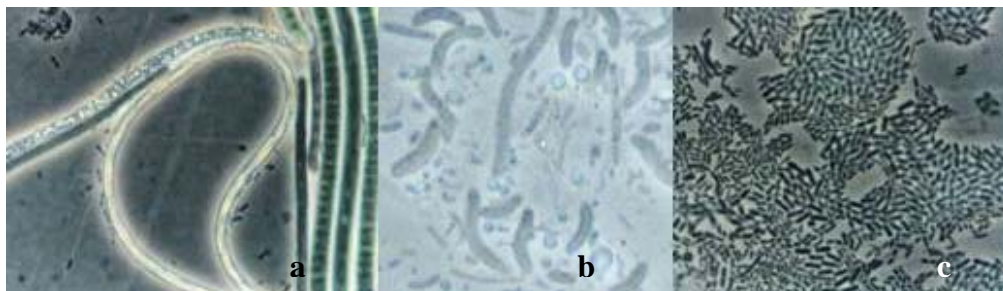


Figura 5.30 – Microscopia de contraste de fase da espuma esverdeada. (a) filamentos de *Beggiatoa* com grânulos refringentes e cianobactérias. (b) bacilos grandes com grânulos internos. (c) aglomerado de bacilos. Aumento de 1000x.

5.7.2 Caracterização microbiológica da espuma acinzentada

A espuma de coloração predominantemente acinzentada foi coletada nos decantadores dos reatores R1 e R2, nas fases operacionais 2, 3 e 4.

A principal mudança entre os tipos morfológicos presentes na espuma predominantemente acinzentada e os presentes na espuma predominantemente esverdeada, se refere à ausência de cianobactérias e de algas unicelulares nos primeiros, podendo isso estar relacionada à presença de lodo anaeróbio em excesso na espuma, resultando em condições desfavoráveis para o desenvolvimento dos microrganismos fotossintetizantes. A condição de anoxia seria estabelecida, tanto pela presença de lodo em excesso proveniente da digestão anaeróbia, quanto pela ausência de fotossíntese oxigênica realizada pelas algas, refletindo na ausência dos microrganismos microaerofílicos semelhantes ao gênero *Beggiatoa* nessa espuma de coloração acinzentada.

Os tipos morfológicos predominantes visualizados na superfície externa da espuma acinzentada foram filamentos longos com grânulos internos, bacilos retos, bacilos curvos e os já citados longos espirilos semelhantes a *Thiospirillum* (Figuras 5.31a e 5.31b). O interior da espuma caracterizou-se pela presença de bacilos retos pequenos, vistos freqüentemente como aglomerados celulares semelhantes aos descritos para espécies formadoras de flocos (Figura

5.31c). Provavelmente, estes bacilos constituem o lodo flocofento do interior do reator que vem à superfície do decantador.

Pode-se especular que a ausência dos microrganismos microaerofílicos oxidadores de sulfeto comprometa a taxa de oxidação do sulfeto presente no decantador, isso porque a oxidação aeróbia do sulfeto é mais rápida do que a sua oxidação em condições de anoxia (Lens e Kuenen, 2001). No entanto, a possível presença de microrganismos anaeróbios do gênero *Thiospirillum* sugere que o sulfeto possa estar sendo oxidado a enxofre elementar, mesmo em condições de anoxia.

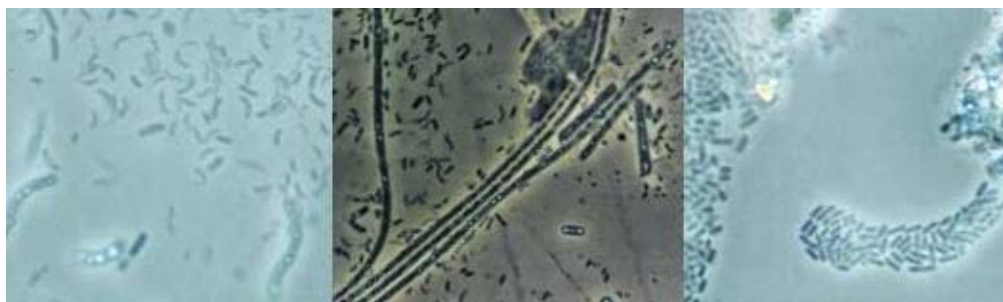


Figura 5.31 – Microscopia de contraste de fase da espuma acinzentada. (a) (b) bacilos e filamentos com grânulos internos. (c) bacilos aglomerados. Aumento de 1000x.

Acredita-se que a presença de microrganismos fotossintetizantes na espuma pode ser um aspecto positivo para a operação dos reatores anaeróbios, uma vez que a produção de oxigênio pode auxiliar em processos de oxidação de compostos reduzidos, potencialmente presentes na espuma e no efluente do reator anaeróbio. Ainda, esse ambiente microaerado pode favorecer o crescimento de bactérias aeróbias oxidadoras de sulfeto, cuja atividade contribui para a redução da emissão de maus odores decorrentes dos compostos dissolvidos na fase líquida, os quais podem ser desprendidos para a atmosfera.

Os resultados de caracterização morfológica dos microrganismos da espuma, apresentados nesse trabalho, sugerem que bactérias oxidadoras de sulfeto poderiam estar presentes na superfície dos decantadores dos reatores UASB investigados, no entanto uma identificação precisa destas bactérias bem como monitoramentos do perfil de sulfato/sulfeto são necessários para confirmar a hipótese de que tais bactérias contribuem significativamente para a redução da emissão de maus odores em reatores UASB.

6 CONCLUSÕES

Caracterização quantitativa da espuma acumulada nos reatores UASB

- Para reatores UASB operados com TDH próximos de 7 a 9 horas, velocidades ascensionais próximas de 0,50 a 0,71 m/h e área de influência dos tubos distribuidores em torno de 2,2 a 3,1 m², espera-se valores de coeficientes de acumulação de espuma nos decantadores bastante reduzidos (variando em média de 0,01 a 0,05 l/kg DQO_{apl.} ou 1 a 5 gST/kg DQO_{apl.}), o que facilita o controle dessa camada nos reatores UASB.
- Reatores UASB operados com TDH perto de 5 horas, velocidade ascensional em torno de 1,10 m/h e área de influência dos tubos distribuidores próxima de 3,1 m², podem apresentar acumulações de espuma no decantador consideravelmente maiores do que as usuais (variando em média de 0,15 a 0,49 l/kg DQO_{apl.} ou 19 a 73 gST/kg DQO_{apl.}). Isto representa, do ponto de vista da operação de retiradas dessa espuma acumulada, um grande dificultador de gerenciamento. Também nessa situação manifestaram-se os maiores coeficientes de acumulação de espuma para o decantador do reator UASB alimentado com esgoto bruto passado pelo peneiramento forçado (R2), relativamente aos do reator que teve como afluente esgoto bruto (R1). Para as essas condições operacionais, é possível que o peneiramento forçado revele sua atuação, ao reduzir o tamanho médio das partículas afluentes ao reator UASB. Este fato, se por um lado acelera as taxas de conversões metabólicas dentro do reator, por outro pode reduzir a capacidade de sedimentação de sólidos e dificultar a formação de agregados de microrganismos, o que favoreceria o arraste e flotação de lodo anaeróbio para a zona de decantação.
- Em geral, para os experimentos realizados, conseguiu-se refutar a hipótese de que o precedente peneiramento forçado (ranhuras espaçadas de 1 mm) do esgoto bruto afluente a um reator UASB conseguiria criar condições para minimização da formação e acúmulo de espuma na superfície do reator. Isto porque nas três condições operacionais mais usuais aplicadas aos reatores UASB (fases 1, 2 e 4) não se detectou diferenças evidentes entre as quantidades de espuma acumuladas nos decantadores dos dois reatores geminados.
- Para uma mesma área de influência de tubos distribuidores (AITD = 3,1 m²), a acumulação de espuma no decantador dos reatores UASB redundou maior quando TDH e a velocidade ascensional variaram, respectivamente, de 9 para 7 horas e de 0,50 para 0,71 m/h. Uma possível explicação é que mais SST, constituídos de flocos de lodo anaeróbio mais leves

ou de material não degradado do afluente, foram carregados da zona de digestão para a zona de decantação sem terem condições de retornar para a zona de digestão.

- Foi notada uma perspectiva de autocontrole no processo de acumulação da espuma no decantador do reator UASB monitorado em período prolongado, porque houve evidências de atuação dos fenômenos de diminuição do espessamento da camada. Percebeu-se que o descarte de lodo do interior do reator foi um fator que teria influenciado na diminuição da formação de espuma e que a forte chuva ocorrida no final do período de acompanhamento teria sido a principal responsável por redução no volume da camada de espuma.
- Os coeficientes de acumulação da espuma no interior do separador trifásico foram mais baixos do que na superfície do decantador dos reatores UASB, provavelmente o que favoreceu isso foi a agitação provocada pelo desprendimento de biogás e o maior tempo entre retiradas do material acumulado no interior do separador.

Caracterização físico-química para a espuma acumulada nos reatores UASB

- As ordens de grandeza aproximadas para as características físico-químicas da espuma do decantador foram: para ST, 90.000 mg/l, para DQO, 140.000 mg/l, para DBO, 40.000 mg/l, e para STV/ST, 70 %. Tais valores levantados permitiram qualificar a espuma como um material extremamente concentrado de sólidos em meio aquoso, sendo esses sólidos, em boa parte, de natureza orgânica.
- Concluiu-se que não houve alterações qualitativas na espuma do decantador do reator UASB em função do prévio peneiramento forçado do esgoto bruto. Isto por que não se percebeu tendência sustentável e explicável para as diferenças entre as médias dos parâmetros físico-químicos avaliados comparando-se os reatores UASB idênticos (R1 e R2) nas várias fases operacionais.
- Os resultados revelaram uma evolução crescente, quando o TDH sofreu diminuições (de 9 para 7 e daí para 5 horas) e a velocidade ascensional sofreu aumentos (de 0,50 para 0,71 e daí para 1,10 m/h), no que diz respeito aos parâmetros ST e DQO da espuma do decantador dos reatores UASB. Posteriormente, o retorno a parâmetros operacionais menos intensivos (TDH de 9 horas e velocidade ascensional de 0,50 /h) provocou um aparente decréscimo para os mesmos qualificadores. Portanto, o que se evidenciou nessa avaliação foi que a diminuição do TDH nos compartimentos do reator e, conjuntamente, o aumento da velocidade ascensional tenderam a promover uma intensificação na concentração da espuma como função de um maior aporte de sólidos à camada de espuma.

- Verificaram-se diminuições na relação STV/ST e aumentos na relação DQO/DBO para espuma do decantador, quando as condições operacionais evoluíram durante a pesquisa. Dessa forma, houve reflexos de diminuição no potencial biodegradabilidade do resíduo da espuma quando os parâmetros operacionais do reator se intensificaram. A explicação para a menor biodegradabilidade potencial é pelo maior aporte de sólidos de mais difícil biodegradação à camada de espuma do decantador, em função de condições operacionais criadas essencialmente por menores TDH e maiores velocidades de ascensão do líquido.
- Para a espuma do decantador do reator UASB R3 conseguiu-se negar a hipótese de que haveria mudanças qualitativas, de ordem físico-química, desse material com o passar do tempo. A variação para os parâmetros medidos (ST, DQO, DBO e STV) foi pequena, ao longo do monitoramento de mais de sete meses sem a retirada total da camada acumulada.
- A espuma acumulada no interior do separador se apresentou mais diluída, com concentrações de todos os parâmetros bem inferiores às encontradas na espuma do decantador. Adicionalmente a espuma do separador apresentou uma estabilização maior do que a da espuma do decantador, tanto pela menor relação STV/ST quanto pela maior relação DQO/DBO. Esses fenômenos talvez se expliquem em função da biodegradação anaeróbia ser mais efetiva no interior do separador trifásico do que na superfície do decantador, favorecida pela agitação provocada pelo desprendimento de biogás, maior contato com a biomassa e pelo maior tempo entre retiradas do material acumulado no interior do separador.
- A simulação de não retenção da espuma na superfície do decantador, de uma forma geral, revelou valores reduzidos como incrementos aos parâmetros de qualidade dos efluentes no que toca à DQO e SST, a não ser para as espumas dos reatores R1 e R2 na fase 3 (TDH = 5 h e $V_{asc.} = 1,1$ m/h). Assim sendo, por exemplo, para a fase operacional 2 e reator R1, a influência dos sólidos da espuma sobre o efluente pioraria cerca de 1,2 % e 2,0 % a qualidade do efluente, respectivamente, para DQO e SST (para efluente com 150 mg/l de DQO e 60 mg/l de SST).

Fração biodegradada da espuma acumulada nos decantadores dos reatores UASB

- Não houve qualquer diferença considerável entre as espumas acumuladas nos decantadores dos reatores UASB idênticos, seja para a fração biodegradada aerobiamente ou para a anaerobiamente. Esses fatos dão a entender que o peneiramento forçado antecedendo ao reator UASB não impõe mudanças em mais esse parâmetro qualitativo.

- A fração biodegradada aerobiamente para a espuma dos decantadores dos reatores UASB idênticos evoluiu das duas primeiras fases para a terceira, com diminuição do TDH, em decréscimo, tanto no curto como no longo prazo. Por sua vez, a fração biodegradada anaerobiamente de longo prazo também se mostrou menor quando o TDH foi 5 horas e a velocidade ascensional foi 1,10 m/h. Tais fatos vieram reforçar a hipótese de que sólidos de mais difícil biodegradação estariam aportando à camada de espuma, na medida em que o TDH global dos reatores diminui e a velocidade ascensional aumenta.
- A variação temporal para as frações biodegradadas da espuma do decantador do reator UASB monitorado por tempo prolongado (mais de 7 meses) apresentaram algumas tendências para as biodegradações de longo prazo. Verifica-se que a fração biodegradada aerobiamente tendeu a um ligeiro crescimento e a fração biodegradada anaerobiamente tendeu contundentemente a um decréscimo, durante a grande parte do tempo. O evento de precipitação forte, registrado durante o último período de avaliação, provavelmente foi o fator causal da alteração qualitativa repentina sobre os valores de percentagem de biodegradação aeróbia e anaeróbia, os quais retornaram, quase identicamente, aos iniciais.

Caracterização cromatográfica da espuma acumulada nos reatores UASB

- De forma geral, grande parte dos compostos detectados nas amostras da camada de espuma do decantador não foram detectados no esgoto afluente aos reatores. Assim, confirma-se o fato de que a camada de espuma concentra materiais hidrofóbicos e de baixa densidade.
- A maioria dos compostos orgânicos detectados nas amostras de espuma do decantador não esteve presente nos efluentes ou, se esteve, tinha detecção insignificante quando comparada com a espuma. Ou seja, a camada de espuma acumulada pode contribuir para a retenção desses compostos no reator, aumentando a chance de eles serem degradados pela biota aeróbia que ali se desenvolvesse em função do oxigênio fornecido pelos microrganismos fotossintetizantes presentes.

Caracterização microbiológica da espuma acumulada nos reatores UASB

- A visualização microscópica da espuma de coloração esverdeada, para o decantador dos reatores, revelou a presença de muitos microrganismos filamentosos, longos e entrelaçados, constituindo uma matriz biológica que provavelmente contribui para a formação compacta da espuma. Além de filamentos de cianobactérias, foram observados microrganismos unicelulares de coloração esverdeada. Os filamentos semelhantes a *Beggiatoa* foram freqüentemente visualizados na superfície externa associados aos

filamentos de cianobactéria provavelmente para se beneficiar do oxigênio produzido durante a atividade fotossintética da mesma. Nesta condição, a oxidação do sulfeto ocorre parcialmente, sendo enxofre elementar o produto final da reação, o qual é acumulado em forma de grânulos intracelulares. Uma vez que grânulos intracelulares foram observados, acredita-se que o tipo morfológico semelhante à *Beggiatoa* esteja realizando a oxidação parcial do sulfeto. Também foram observados bacilos grandes, móveis, espiralados, com grânulos internos, predominantemente localizados no interior desse tipo de espuma, cuja morfologia se assemelha à de bactérias do enxofre do gênero *Thiospirillum*.

- A principal mudança entre os tipos morfológicos presentes na espuma de superfície acinzentada e os presentes na espuma esverdeada se refere à ausência de cianobactérias e de algas unicelulares nos primeiros, podendo isso estar relacionado à presença de lodo anaeróbio em excesso na espuma, resultando em condições desfavoráveis para o desenvolvimento dos microrganismos fotossintetizantes. Os tipos morfológicos predominantes visualizados na superfície externa dessa espuma foram filamentos longos com grânulos internos, bacilos retos, bacilos curvos e longos espirilos semelhantes a *Thiospirillum*. O interior da espuma caracterizou-se pela presença de bacilos retos pequenos, vistos freqüentemente como aglomerados celulares. Provavelmente, estes bacilos constituem o lodo floculento do interior do reator que vem à superfície do decantador.
- A presença de microrganismos fotossintetizantes na espuma do decantador pode ser um aspecto positivo para a operação dos reatores anaeróbios, uma vez que a produção de oxigênio pode auxiliar em processos de oxidação de compostos reduzidos, potencialmente presentes na espuma e no efluente do reator anaeróbio. Ainda, esse ambiente microaerado pode favorecer o crescimento de bactérias aeróbias oxidadoras de sulfeto, cuja atividade contribui para a redução da emissão de maus odores decorrentes dos compostos dissolvidos na fase líquida, os quais podem ser desprendidos para a atmosfera.

7 RECOMENDAÇÕES

Como recomendações sobre o tema do presente estudo, levantaram-se alguns itens que possam ser interessantes como aprofundamento e complementação da matéria:

- Determinar coeficientes de acumulação de espuma dentro de uma fase experimental não tão longa, cerca de dois meses, porém sem a retirada periódica da espuma acumulada;
- Avaliar a interferência do cobrimento do reator sobre as características de acumulação de espuma e, também, sobre as características microbiológicas da camada;
- Investigar a melhor forma de remoção da espuma eventualmente formada no interior do separador, seja com a pressurização adicional do espaço gasoso ou com a despressurização do mesmo;
- Desenvolver outras formas de controle da camada de espuma constituída no interior do separador trifásico;
- Determinar o potencial de formação de espuma de lodos biológicos de reatores UASB, correlacionado com a acumulação de espuma efetivamente verificada;
- Estender o estudo de medição quantitativa e qualitativa de espumas acumuladas em reatores UASB para a escala real;
- Avançar o estudo sobre a biodegradação aeróbia e anaeróbia de espuma para digestores de bancada a fim de confirmar, em escala maior, a possibilidade de degradação adicional desse resíduo;
- Investigar a contribuição de uma camada de espuma constituída e estável no controle de emanações de maus odores, a partir de aspectos microbiológicos e físico-químicos;
- Aprofundar a determinação da constituição química específica da espuma, seja no que diz respeito a proteínas, carboidratos e lipídeos, seja na identificação dos compostos verificados nos cromatogramas obtidos e verificar se tais compostos são posteriormente degradados por microrganismos aeróbios que se desenvolvem na camada de espuma.

8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILAR, A.; CASAS, C.; LEMA, J. M. Degradation of volatile fatty acids by differently enriched mehanogenic cultures: kinetics and inhibition. *Waters Research*. v. 29 n. 2 p. 505 – 509 *apud* VIDAL, G.; CARVALHO, A.; MÉNDEZ, R.; LEMA, J. M. Influence of the content in fats and proteins on the anaerobic biodegradability of dairy wastewaters. *Bioresource Thenology*, v. 74, p. 231 – 239, 2000.
- ANAGNOSTIDIS, K.; KOMÁREK, J. Modern approach to the classification system of cyanophytes 3. Oscillatoriales. *Arch. Hydrobiol. Suppl.*. 80 1-4 Stuttgart. p. 327-472. 1988.
- APHA/AWWA/ WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20 ed. Washington: 1998.
- AQUINO, S. F.; CHERNICHARO, C. A. L. Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 10, n. 2, p. 152 – 161. 2005
- AQUINO, S. F.; SILVA, S. Q.; CHERNICHARO, C. A. L. Considerações práticas sobre o teste de demanda química de oxigênio (DQO) aplicado à análises de águas residuárias. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v. 11, n. 4, p. 295 – 304. 2006.
- BARBER, W. Anaerobic digester foaming: causes and solutions. *Water 21*, v. February, p. 45 – 49, 2005.
- BATSTONE, D. J.; KELLER, J.; NEWELL, R. B.; NEWLAND, M. Modelling anaerobic degradation of complex wastewater. I model development. *Bioresource Thenology*, v. 75, p. 67 – 74, 2000.
- BLUNDI, C. E.; GADÊLHA, R. F. Metodologia para determinação de matéria orgânica específica em águas residuárias. In: CHERNICHARO, C. A. L. (coordenador) *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios: aspectos metodológicos*. Belo Horizonte, PROSAB, p.9-18, 2001.
- CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbios*. 1 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997. 246p.
- COOK, E. J.; BOENING, P. H. *Anaerobic Sludge Digestion - Manual of Practice N° 16*. 2 ed. Water Pollution Control Federation, 1987. 118p.
- DE PAULA, F. S.; AQUINO, S. F.; CHERNICHARO, C. A. L. Influence of the hydrodynamics aspects and particle size distribution on efficiency of UASB reactors. In: VIII TALLER Y SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE DIGESTION ANAEROBIA, Punta del Leste, Uruguay. [*Anais eletrônico...*] IWA/Universidad de la Republica, 2005.
- 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 LATINO-AMERICANO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA, Recife, Pernambuco - Brasil. IWA/UFPE, 2000, p.113-120.
- FOOT, R. J.; ROBINSON, M. S. Activated sludge bulking and foaming: microbes and mythes. In: *The Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. Elsevier ISBN, p.525 - 538, 2003.
- FRY, L. J. *Practical building of Methane Power Plants for Rural Energy Independence*. D. A. Knox, Andover, Hampshire, p. 30-4 1975 *apud* RAMAN, P.; RANGA RAO, V.

- V.;KISHORE, V. V. N. A static scum-breaking net for fixed-dome biogás plants. *Biological Wastes*, v.30, p.261 - 273, 1989.
- GARCIA-ENCINA, P. A.; MENCIA, A.; VILLAVERDE, S. Anaerobic degradation of grease and fats in bath tests. In: ANAEROBIC DIGESTION, Montreal. 2004, p.2400.
- GERARD, M. H. *The Microbiology of Anaerobic Digesters*.ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 177p.
- GRANDIN, S. R. *Concepção das estações de tratamento de esgotos do município de Campinas-SP*. 10p. Disponível em <http://www.semase.sp.gov.br/Documentos/Publicar_Internet/trabalhos/trabalho_81.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2006.
- HALALSHEH, M.; KOPPEL, J.; DEN ELZEN, J.; ZEEMAN, G.; FAYYAD, M.; LETTINGA, G. Effect of SRT and temperature on biological conversions and the related scum-forming potencial. *Water Research*, v. 39, p. 2475 – 2482, 2005.
- HWU, C. S.; DONLON, B. e LETTINGA, G. Comparative toxicity of long-chain fatty acid to anaerobic sludges from various origins. *Water Science and Technology*, v. 33, p. 85 – 98, 1996.
- HWU, C. S.; TSENG, S. K.; YUAN, C. Y.; KULIK, Z.; LETTINGA, G. Biosorption of long-chain fatty acids in UASB treatment process. *Water Research*, v. 32, n. 5, p. 1571 – 1579, 1998a.
- HWU, C. S.; VAN LIER, J. B.; LETTINGA, G. Physicochemical and biological performance of expanded granular sludge bed reactors treating long-chain fatty acids. *Process Biochemistry*, v. 33, n. 1, p. 75-81, 1998b.
- KOSTER. I. W., CRAMER, A. Inhibition of methanogenesis from acetate in granular sludge by long chain fatty acid. *Applied and Environmental Microbiology*. v. 53 p. 403-409. 1987 *apud* HWU, C. S.; VAN LIER, J. B.; LETTINGA, G. Physicochemical and biological performance of expanded granular sludge bed reactors treating long-chain fatty acids. *Process Biochemistry*, v. 33, n. 1, p. 75 – 81, 1998b.
- LARKIN, J. M.; STROHL, W. R. Beggiatoa, Thiothrix, and Thioploca. *Annual Review of Microbiology*, v. 37, p. 341 – 367, 1983.
- 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, p. 433 – 444, 2001.
- LENS, P. N. L.; KUENEN, J. G. The biological sulfur cycle: novel opportunities for environmental biotechnology. *Water Science and Technology*, v. 44, n. 8, p.57 – 66, 2001.
- LUDUVICE, M. Processos de estabilização de lodos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING M.; FERNANDES, F. *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA/UFMG. Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR, p. 484, 2001.
- MADHUKARA, K.; SRILATHA, H. R.; SRINATH, K.; BHARATHI, K.; NAND, K. Production of methane from green pea shells in floating dome digesters. *Process Biochemistry*, v. 32, n. 6, p. 509 – 513, 1997.
- MAHMOUD, N.; ZEEMAN, G.; GIJZEN, H.; LETTINGA, G. Solids removal in upflow anaerobic reactor, a review. *Bioresour. Technol.*, v. 90, p. 1 –9, 2003.

- MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; PARKER, J. *Biology of Microorganisms*, 10th edition, 2003.
- MENDES, A. A.; CASTRO, H. F. Aplicação de lipases no tratamento de águas residuárias com elevados teores de lipídeos. *Química Nova*, v. 28, n. 2, p.296 –305, 2005.
- MENDONÇA, L. C.; GIANOTTI, E. P.; CAMPOS, A. L. O.; CAMPOS, J. R. Bactérias filamentosas em sistema de lodos ativados tratando efluente de reator anaeróbio. In: 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Joinville - Santa Catarina. ABES, 2003, p.7.
- METCALF; EDDY *Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*.3 ed. Metcalf & Eddy, Inc., 1991. 1334p.
- MIRON, Y., ZEEMAN, G., VAN LIER, J. B., LETTINGA, G. The role of sludge retention time in the hydrolysis and acidification of lipids, carbohydrates and proteins during digestion of primary sludge in CSTR systems. *Water Research* v. 34, n. 5, p. 1705-1713, 2000
- MOEN, G. Anaerobic digester foaming: causes and solutions. *Water Environ Technol*, v. 15, n. 8, p. 70 – 73, 2003.
- ONG, H. K.; GREENFIELD, P. F.; PULLAMMANAPPALLIL, P. C. An operational strategy for improved biomethanation of cattle-manure slurry in an unmixed, single-stage, digester. *Bioresource Technology*, v. 73, p. 87 – 89, 2000.
- OWEN, W. F.; STUCKEY, D. C. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Water Research*, v. 13, p. 485 – 492, 1979.
- PAGILLA, K. R.; CRANEY, K. C.;KIDO, W. H. Cause and effects of foaming in anaerobic sludge digesters. *Water Science and Technology*, v. 36, n. 6-7, p. 463 – 470, 1997.
- PAGLIUSO, J. D.; PASSIG, F. H.; VILLELA, L. C. H. Odour treatment and energy recovery in anaerobic sewage treatment plants. In: VII OFICINA E SIMPOSIO LATINO-AMERICANO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA, Mérida, Yucatán - México. IWA/FEMISCA, 2002, p. 553 – 560.
- PÉREZ, H.;VILLA, P. *Desulfuración Biológica: Una Alternativa para el Tratamiento de Emisiones de Gases a la Atmósfera*. p. 22 – 27, 2005.
- PERLE, M.; KIMCHIE, S.; SHELEF, G. Some biochemical aspects of the anaerobic degradation of dairy wastewater. *Water Research*, v. 29, n. 6, p. 1549 – 1554, 1995.
- PINTO, M. T. Higienização de lodos. In: ANDREOLI, C. V., VON SPERLING, M.,FERNANDES, F. *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA/UFMG Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR, p. 484, 2001.
- RAMAN, P.; RANGA RAO, V. V.; KISHORE, V. V. N. A static scum-breaking net for fixed-dome biogás plants. *Biological Wastes*, v. 30, p. 261 – 273, 1989.
- RANKIN, R. S. Scum control in digesters. *Sewage Works J.*, v. 19, p. 405 – 414, 1947 *apud* RAMAN, P.; RANGA RAO, V. V.; KISHORE, V. V. N. A static scum-breaking net for fixed-dome biogás plants. *Biological Wastes*, v. 30, p. 261 – 273, 1989.
- ROCHA, N. E. P. *Avaliação de um sistema de tratamento de esgotos constituído de reator UASB e lagoa facultativa, em escala real*.147f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas gerais, Belo Horizonte, 2002.

SANTOS, S. E. *Avaliação do desempenho operacional de um sistema reator UASB - Lagoa de polimento, Estudo de caso da ETE Juramento-MG*. 133f. 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 espuma e lodo em um reator UASB em escala real tratando esgoto doméstico. In: III SIMPÓSIO SOBRE BIODISSÓLIDOS DO MERCOSUL, I SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE BIODISSÓLIDOS, São Paulo. [Anais Eletrônico] 2003, p.1 – 10.

SATO, N.; OKUBO, T.; ONODERA, T.; OHASHI, A.; HARADA, H. Prospects for a self-sustainable sewage treatment system: A case study on full-scale UASB system in India's Yamuna River Basin. *Journal of Environmental Management*, v. Article in press, p. 1 – 10, 2005.

TEIXEIRA, A. R.; ALVES, C. V. P.; DE PAULA, F. S.; AQUINO, S. F.; CHERNICHARO, C. A. L. Influência do peneiramento forçado do esgoto bruto no desempenho de Reator UASB tratando esgoto doméstico. In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Campo Grande. [Anais eletrônico...].2005.

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.

VAN HAANDEL, A.; MARAIS, G. *O comportamento do Sistema de Lodo Ativado*.ed. Campina Grande: epgraf, 1999. 488p.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte. 452p. 2005.

VERSIANI, B. M. *Desempenho de um reator UASB submetido a diferentes condições operacionais tratando esgotos sanitários do Campus da UFRJ*. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

VIDAL, G.; CARVALHO, A.; MÉNDEZ, R.; LEMA, J. M. Influence of the content in fats and proteins on the anaerobic biodegradability of dairy wastewaters. *Bioresource Technology*, v. 74, p. 231 – 239, 2000.

ZEEMAN, G.; SANDERS, W. Potential of anaerobic digestion of complex waste (water). *Water Science and Technology*, v. 44, n. 8, p. 115 – 122, 2001.

APÊNDICE A

Qualidade físico-química dos afluentes

- Reator R1
- Reator R2
- Reator R3

Fase1

| Data | DQO (mg/L) | | SST (mg/L) | |
|-------------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|
| | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 26/10/2005 | 294 | 460 | 293 | 270 |
| 5/11/2005 | 635 | 385 | 313 | 260 |
| 9/11/2005 | 545 | 364 | 218 | 233 |
| 12/11/2005 | 489 | 487 | 205 | 245 |
| 16/11/2005 | 374 | 526 | 175 | 275 |
| 19/11/2005 | 243 | 209 | | |
| 23/11/2005 | 249 | 407 | 220 | 160 |
| 26/11/2005 | 211 | 202 | 218 | 233 |
| 3/12/2005 | 427 | 549 | 205 | 246 |
| 7/12/2005 | 359 | 499 | | |
| 10/12/2005 | 430 | 407 | 210 | 205 |
| 14/12/2005 | 231 | 87 | 168 | 196 |
| 17/12/2005 | 233 | 278 | | |

Fase2

| Data | DQO (mg/L) | | SST (mg/L) | |
|-------------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|
| | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 18/1/2005 | 474 | 507 | 172 | 188 |
| 21/1/2005 | 304 | 328 | 159 | 172 |
| 25/1/2005 | 496 | 498 | 201 | 234 |
| 28/1/2005 | 282 | 274 | 146 | 155 |
| 1/2/2005 | 473 | 437 | 175 | 198 |
| 11/2/2005 | 480 | 487 | 204 | 213 |
| 18/2/2005 | 376 | 409 | 153 | 198 |
| 25/2/2005 | 443 | 497 | 166 | 193 |
| 4/3/2005 | 268 | 229 | 100 | 141 |
| 8/3/2005 | 508 | 429 | 206 | 187 |
| 11/3/2005 | 324 | 303 | | 176 |
| 15/3/2005 | 427 | 484 | 214 | 218 |
| 16/3/2005 | 376 | 357 | 170 | 192 |
| 18/3/2005 | 332 | 325 | 150 | 162 |

Fase3

| Data | DQO (mg/L) | | SST (mg/L) | |
|-------------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|
| | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 15/4/2005 | 419 | 367 | 169 | 189 |
| 19/4/2005 | 394 | 397 | 223 | 188 |
| 20/4/2005 | 291 | 297 | 206 | 176 |
| 26/4/2005 | 341 | 438 | 149 | 268 |
| 29/4/2005 | 394 | 378 | 217 | 353 |
| 3/5/2005 | 354 | 333 | 201 | 191 |
| 6/5/2005 | 606 | 403 | 289 | 190 |
| 10/5/2005 | 550 | 541 | 236 | 207 |
| 13/5/2005 | 334 | 402 | 201 | 252 |
| 17/5/2005 | 453 | 405 | 201 | 208 |
| 19/5/2005 | 616 | 559 | 226 | 130 |
| 24/5/2005 | 422 | 432 | 187 | 209 |
| 31/5/2005 | 399 | 394 | 243 | 247 |
| 3/6/2005 | | | 218 | 232 |

Fase 4

| Data | DQO (mg/L) | | SST (mg/L) | |
|-------------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|
| | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 19/7/2005 | 550 | 541 | 217 | 169 |
| 22/7/2005 | 502 | 504 | 203 | 235 |
| 26/7/2005 | 499 | 532 | 162 | 169 |
| 29/7/2005 | 452 | 483 | 185 | 170 |
| 2/8/2005 | 401 | 391 | 237 | 218 |
| 5/8/2005 | 429 | 431 | 228 | 204 |
| 9/8/2005 | 485 | 487 | 206 | 158 |
| 12/8/2005 | 458 | 405 | 236 | 164 |
| 16/8/2005 | 437 | 443 | 171 | 212 |
| 19/8/2005 | 449 | 336 | 208 | 178 |
| 23/8/2005 | 399 | 351 | 234 | 204 |
| 26/8/2005 | 430 | 427 | 217 | 198 |
| 30/8/2005 | 424 | 371 | 196 | 156 |
| 2/9/2005 | 324 | 250 | 224 | 196 |
| 6/9/2005 | 398 | 401 | 220 | 208 |
| 13/9/2005 | 410 | 466 | 192 | 131 |
| 16/9/2005 | 465 | 513 | 184 | 250 |

Reator R3

| Data | DQO (mg/l) | SST (mg/l) |
|-------------|-----------------------|-----------------------|
| 18/1/2005 | 474 | 172 |
| 21/1/2005 | 304 | 159 |
| 25/1/2005 | 496 | 201 |
| 28/1/2005 | 282 | 146 |
| 1/2/2005 | 473 | 175 |
| 11/2/2005 | 480 | 204 |
| 18/2/2005 | 376 | 153 |
| 25/2/2005 | 443 | 166 |
| 4/3/2005 | 268 | 100 |
| 8/3/2005 | 508 | 206 |
| 11/3/2005 | 324 | |
| 15/3/2005 | 427 | 214 |
| 16/3/2005 | 376 | 170 |
| 18/3/2005 | 332 | 150 |
| 15/4/2005 | 419 | 169 |
| 19/4/2005 | 394 | 223 |
| 20/4/2005 | 291 | 206 |
| 26/4/2005 | 341 | 149 |
| 29/4/2005 | 394 | 217 |
| 3/5/2005 | 354 | 201 |
| 6/5/2005 | 606 | 289 |
| 10/5/2005 | 550 | 236 |
| 13/5/2005 | 334 | 201 |
| 17/5/2005 | 453 | 201 |
| 19/5/2005 | 616 | 226 |
| 24/5/2005 | 422 | 187 |
| 31/5/2005 | 399 | 243 |
| 19/7/2005 | 550 | 217 |
| 22/7/2005 | 502 | 203 |
| 26/7/2005 | 499 | 162 |
| 29/7/2005 | 452 | 185 |
| 2/8/2005 | 401 | 237 |
| 5/8/2005 | 429 | 228 |
| 9/8/2005 | 485 | 206 |
| 12/8/2005 | 458 | 236 |
| 16/8/2005 | 437 | 171 |
| 19/8/2005 | 449 | 208 |
| 23/8/2005 | 399 | 234 |
| 26/8/2005 | 430 | 217 |
| 30/8/2005 | 424 | 196 |
| 2/9/2005 | 324 | 224 |
| 6/9/2005 | 398 | 220 |
| 13/9/2005 | 410 | 192 |
| 16/9/2005 | 465 | 184 |

APÊNDICE B

Valores de acumulação de espuma

- Reator R1
- Reator R2
- Reator R3

Fase1

| Data da coleta | Volumes acumulados (l) | | Acumulação (L/kgDQO _{apl.}) | | Acumulação (gST/kgDQO _{apl.}) | | Acumulação (L/kgSST _{apl.}) | | Acumulação (gST/kgSST _{apl.}) | |
|----------------|------------------------|-----|---------------------------------------|-------|---|------|---------------------------------------|-------|---|------|
| | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 4/11/2004 | 1,5 | 3,1 | 0,009 | 0,019 | 0,54 | 1,33 | 0,014 | 0,031 | 0,83 | 2,13 |
| 18/11/2004 | 0,8 | 2,0 | 0,003 | 0,009 | 0,30 | 0,76 | 0,007 | 0,015 | 0,67 | 1,32 |
| 2/12/2004 | 2,0 | 2,4 | 0,017 | 0,017 | 1,68 | 1,71 | 0,022 | 0,027 | 1,84 | 2,20 |
| 16/12/2004 | 3,6 | 0,7 | 0,019 | 0,004 | 1,47 | 0,34 | 0,036 | 0,007 | 2,75 | 0,60 |

Fase2

| Data da coleta | Volumes acumulados (l) | | Acumulação (L/kgDQO _{apl.}) | | Acumulação (gST/kgDQO _{apl.}) | | Acumulação (L/kgSST _{apl.}) | | Acumulação (gST/kgSST _{apl.}) | |
|----------------|------------------------|-----|---------------------------------------|-------|---|------|---------------------------------------|-------|---|------|
| | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 27/1/2005 | 0,9 | 9,0 | 0,004 | 0,038 | 0,40 | 4,30 | 0,010 | 0,086 | 0,97 | 9,66 |
| 10/2/2005 | 6,5 | 7,0 | 0,021 | 0,024 | 1,70 | 1,78 | 0,050 | 0,050 | 4,00 | 3,77 |
| 24/2/2005 | 11,0 | 6,5 | 0,034 | 0,019 | 2,96 | 1,77 | 0,086 | 0,044 | 7,35 | 4,08 |
| 10/3/2005 | 17,0 | 7,5 | 0,063 | 0,032 | | | 0,133 | 0,061 | | |
| 18/3/2005 | 8,0 | 2,0 | 0,052 | 0,013 | 4,44 | 1,29 | 0,107 | 0,025 | 9,09 | 2,49 |

Fase3

| Data da coleta | Volumes acumulados (l) | | Acumulação (L/kgDQO _{apl.}) | | Acumulação (gST/kgDQO _{apl.}) | | Acumulação (L/kgSST _{apl.}) | | Acumulação (gST/kgSST _{apl.}) | |
|----------------|------------------------|-------|---------------------------------------|-------|---|--------|---------------------------------------|-------|---|--------|
| | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 22/4/2005 | 22,0 | 183,0 | 0,082 | 0,708 | 6,42 | 105,31 | 0,151 | 1,358 | 11,84 | 201,98 |
| 28/4/2005 | 8,0 | 150,0 | 0,045 | 0,755 | 3,31 | 118,65 | 0,090 | 0,991 | 6,66 | 155,85 |
| 12/5/2005 | 48,0 | 222,0 | 0,084 | 0,458 | 11,48 | 75,20 | 0,174 | 0,996 | 23,87 | 163,41 |
| 24/5/2005 | 104,0 | 17,0 | 0,234 | 0,116 | 32,07 | 10,93 | 0,524 | 0,262 | 71,80 | 24,60 |
| 3/6/2005 | 104,0 | 143,0 | 0,312 | 0,426 | 42,78 | 57,98 | 0,593 | 0,768 | 81,29 | 104,44 |

Fase4

| Data da coleta | Volumes acumulados (l) | | Acumulação (L/kgDQO _{apl.}) | | Acumulação (gST/kgDQO _{apl.}) | | Acumulação (L/kgSST _{apl.}) | | Acumulação (gST/kgSST _{apl.}) | |
|----------------|------------------------|------|---------------------------------------|-------|---|-------|---------------------------------------|-------|---|--------|
| | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 1/8/2005 | 44,0 | 43,0 | 0,298 | 0,283 | 41,41 | 34,03 | 0,779 | 0,786 | 108,16 | 94,39 |
| 12/8/2005 | 34,0 | 41,0 | 0,286 | 0,357 | 39,83 | 50,48 | 0,560 | 0,823 | 77,86 | 116,30 |
| 26/8/2005 | 6,5 | 14,5 | 0,040 | 0,099 | 3,91 | 9,78 | 0,084 | 0,195 | 8,08 | 19,22 |
| 9/9/2005 | 1,5 | 3,0 | 0,010 | 0,023 | 1,16 | 2,04 | 0,019 | 0,043 | 2,08 | 3,73 |
| 15/9/2005 | 2,4 | 3,0 | 0,034 | 0,038 | 3,10 | 2,94 | 0,079 | 0,098 | 7,22 | 7,56 |

Reator R3

| Data | Volume acumulado(L) | Acumulação (L/kgSST _{apl.}) | Acumulação (gST/kgSST _{apl.}) | Acumulação (L/kgDQO _{apl.}) | Acumulação (gST/kgDQO _{apl.}) |
|-----------|------------------------|--|--|--|--|
| 18/1/2005 | - | - | - | - | - |
| 23/3/2005 | 4 | 0,010 | 1,04 | 0,004 | 0,45 |
| 2/6/2005 | 27 | 0,049 | 5,80 | 0,024 | 2,86 |
| 12/8/2005 | 19 | 0,035 | 4,35 | 0,016 | 1,93 |
| 15/9/2005 | -5,5 | -0,023 | -2,41 | -0,011 | -1,19 |

APÊNDICE C

Qualidade físico-química da espuma

- Reator R1
- Reator R2
- Reator R3

Fase1

| Data da coleta | DBO(mg/L) | | DQO(mg/L) | | ST(mg/L) | | STV/ST (%) | | STV(mg/L) | | Proteínas (mg/L) | | Carboidratos (mg/L) | | Lipídeos (mg/L) | |
|----------------|-----------|-------|-----------|--------|----------|-------|------------|----|-----------|-------|------------------|----|---------------------|----|-----------------|----|
| | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 4/11/2004 | 19237 | 18356 | 61490 | 65714 | 60580 | 69330 | 72 | 68 | 43775 | 47172 | | | | | | |
| 18/11/2004 | | | 77608 | 119601 | 94340 | 85113 | 85 | 78 | 79905 | 66078 | | | | | | |
| 2/12/2004 | 36878 | 48263 | 116008 | 118254 | 81690 | 81275 | 76 | 80 | 61950 | 65137 | | | | | | |
| 16/12/2004 | 50235 | 50481 | 53890 | 116509 | 76020 | 90413 | 78 | 75 | 58930 | 68185 | | | | | | |

Fase2

| Data da coleta | DBO (mg/L) | | DQO(mg/L) | | ST(mg/L) | | STV/ST (%) | | STV(mg/L) | | Proteínas (mg/L) | | Carboidratos (mg/L) | | Lipídeos (mg/L) | |
|----------------|------------|-------|-----------|--------|----------|--------|------------|----|-----------|-------|------------------|-------|---------------------|-------|-----------------|-------|
| | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 27/1/2005 | 44924 | 39610 | 91566 | 174699 | 100353 | 112033 | 57 | 64 | 56915 | 71240 | | | | | | |
| 10/2/2005 | 28496 | 38858 | 107429 | 140571 | 79405 | 74980 | 64 | 59 | 50955 | 44090 | 19470 | 20606 | 14785 | 13448 | 28783 | 26033 |
| 24/2/2005 | 45890 | 35287 | 186667 | 170667 | 86005 | 93205 | 69 | 67 | 59310 | 62025 | | | | | | |
| 10/3/2005 | 45890 | 48788 | 172381 | 167956 | | | | | | | | | | | | |
| 18/3/2005 | 40875 | 46875 | 112226 | 127007 | 85298 | 99890 | 69 | 73 | 58983 | 72787 | | | | | | |

Fase3

| Data da coleta | DBO (mg/L) | | DQO(mg/L) | | ST(mg/L) | | STV/ST (%) | | STV(mg/L) | | Proteínas (mg/L) | | Carboidratos (mg/L) | | Lipídeos (mg/L) | |
|----------------|------------|-------|-----------|--------|----------|--------|------------|----|-----------|-------|------------------|-------|---------------------|------|-----------------|-------|
| | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 22/4/2005 | | | | | 78403 | 148708 | 60 | 56 | 46693 | 83590 | | | | | | |
| 28/4/2005 | 29250 | 39375 | 102348 | 165994 | 74220 | 157203 | 68 | 56 | 50527 | 88781 | 30167 | 59407 | 2915 | 5986 | 16200 | 21233 |
| 12/5/2005 | 48000 | 46500 | 189263 | 201500 | 136817 | 164037 | 67 | 60 | 91526 | 98441 | 51278 | 59963 | 7790 | 5069 | 23950 | 12567 |
| 24/5/2005 | 51579 | 25263 | 199133 | 100062 | 137099 | 93908 | 66 | 63 | 90003 | 59215 | | | | | | |
| 3/6/2005 | 50400 | 39600 | 181924 | 173761 | 137128 | 136026 | 66 | 64 | 90300 | 86571 | 36074 | 33667 | 7224 | 9581 | 28733 | 22233 |

Fase4

| Data da coleta | DBO (mg/L) | | DQO(mg/L) | | ST(mg/L) | | STV/ST (%) | | STV(mg/L) | | Proteínas (mg/L) | | Carboidratos (mg/L) | | Lipídeos (mg/L) | |
|----------------|------------|-------|-----------|--------|----------|-------|------------|----|-----------|-------|------------------|-------|---------------------|-------|-----------------|-------|
| | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 | R1 | R2 |
| 1/8/2005 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12/8/2005 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26/8/2005 | 40000 | 28125 | 143330 | 136839 | 96764 | 98431 | 71 | 66 | 68780 | 64979 | 40667 | 36667 | 11091 | 11352 | 33787 | 20320 |
| 9/9/2005 | 80800 | 42800 | 190937 | 139215 | 111163 | 87107 | 60 | 73 | 66683 | 63687 | 41704 | 26593 | 16374 | 9896 | 19920 | 7920 |
| 15/9/2005 | 52400 | 37600 | 148571 | 122328 | 90863 | 77160 | 73 | 71 | 66054 | 55036 | 38000 | 40667 | 11548 | 10026 | 15920 | 16520 |

Reator R3

| Data | DBO(mg/l) | DQO(mg/l) | ST(mg/l) | STV/ST(%) |
|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| 18/1/2005 | - | - | - | - |
| 23/3/2005 | 46000 | 151825 | 101533 | 74 |
| 2/6/2005 | 59600 | 187755 | 117520 | 74 |
| 12/8/2005 | 59200 | 173131 | 123033 | 70 |
| 15/9/2005 | 51600 | 171852 | 106877 | 74 |

