



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

---

ESCOLA DE QUÍMICA

**ESTADO DA ARTE DA FORMAÇÃO DE  
ESCUMA EM REATORES ANAERÓBIOS E  
PROPOSTA DE TRATAMENTO  
ENZIMÁTICO/BIOLÓGICO**

LUCAS DAVID ROCHA DA SILVA

PROJETO FINAL DE CURSO

ORIENTADORA: MAGALI CHRISTE CAMMAROTA

CO-ORIENTADORA: FERNANDA RIBEIRO DO CARMO DAMASCENO

RIO DE JANEIRO

2013

# **ESTADO DA ARTE DA FORMAÇÃO DE ESCUMA EM REATORES ANAERÓBIOS E PROPOSTA DE TRATAMENTO ENZIMÁTICO/BIOLÓGICO**

Lucas David Rocha da Silva

Orientadores: Magali Christe Cammarota e Fernanda Ribeiro do Carmo Damasceno

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DE BIOPROCESSOS DA ESCOLA DE QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE BIOPROCESSOS.

Aprovada por:

---

Magali Christe Cammarota (Orientadora)

---

Fernanda Ribeiro do Carmo Damasceno (Orientadora)

---

Rafael Cury Sadock de Freitas (M.Sc.)

---

Denise Maria Guimarães Freire (D.Sc. – IQ/UFRJ)

---

Melissa Limoeiro Estrada Gutarra (D.Sc. – DEB/EQ)

Rio de Janeiro, RJ –Brasil

Junho, 2013

## **AGRADECIMENTOS:**

Agradeço a minha família por todo apoio, força e incentivo durante todas as fases da minha graduação, especialmente a minha mãe.

À minha namorada Juliana Sobral, por acreditar em mim, no meu trabalho e na minha capacidade.

À professora Magali pela orientação e sábios conselhos, sempre com muita atenção.

À doutoranda e orientadora Fernanda, pela ajuda e ensinamentos imprescindíveis para a conclusão desse projeto.

A todos do Laboratório de Tecnologia Ambiental (LTA) pela paciência e disposição de ajudar sempre que necessário.

Agradeço também aos meus amigos que apesar de não estarem presentes nesse projeto, sempre estiveram presentes durante o meu período na faculdade.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção de grau de Engenharia de Bioprocessos.

## **ESTADO DA ARTE DA FORMAÇÃO DE ESCUMA EM REATORES ANAERÓBIOS E PROPOSTA DE TRATAMENTO ENZIMÁTICO/BIOLÓGICO**

Lucas David Rocha da Silva

Junho, 2013

Orientadora: Magali Christe Cammarota

Co-orientadora: Fernanda Ribeiro do Carmo Damasceno

Um dos maiores problemas na operação de reatores UASB (*upflow anaerobic sludge blanket*) em estações de tratamento de esgoto e efluentes industriais é a formação de uma camada de materiais flutuantes, denominada espuma, no compartimento de decantação e no interior do separador trifásico. Esta camada é constituída de óleos, graxas e gorduras provindos do efluente, que por serem de difícil degradação, pouco densos e insolúveis em água, acumulam em uma camada no topo do reator. Neste trabalho foi feito um levantamento bibliográfico sobre a problemática da formação e acúmulo da espuma e métodos de controle e remoção da mesma em reatores anaeróbios. Considerando que gorduras predominam na composição da espuma, é feita uma proposta de tratamento da espuma removida através de hidrólise enzimática das gorduras seguida de retorno do hidrolisado ao reator anaeróbio, com vistas à redução de espuma acumulada e aumento da produção de biogás. Esta etapa de pré-hidrólise foi avaliada com a espuma removida de um reator UASB de bancada tratando efluente de indústria de abate de aves. A hidrólise da espuma removida foi conduzida com 0,5% m/v de um preparado enzimático sólido produzido pelo fungo *Penicillium brevicompactum*, contendo 11 U/g de atividade lipásica, a 30°C por 4h. Ensaios de biodegradabilidade anaeróbia com a espuma hidrolisada resultaram em remoção de DQO acima de 90% e produção específica de metano 63% maior, em comparação a um Controle com espuma não hidrolisada. Este resultado preliminar comprova que a proposta de remoção, hidrólise enzimática e reintrodução da espuma no reator anaeróbio pode ser viável.

# ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>6</b>
<b>1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....</b>	<b>7</b>
1.1. INTRODUÇÃO .....	7
1.2. OBJETIVOS .....	8
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>9</b>
2.1. SISTEMAS ANAERÓBIOS DE TRATAMENTO .....	9
2.2. REATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE E MANTA DE LODO .....	11
2.3. DEFININDO A ESCUMA .....	12
2.4. O PROCESSO DE FORMAÇÃO DA ESCUMA .....	14
2.5. ACÚMULO DE ESCUMA .....	17
2.6. PROBLEMÁTICA DA FORMAÇÃO E ACÚMULO DE ESCUMA .....	19
2.7. MÉTODOS DE CONTROLE E REMOÇÃO DA ESCUMA .....	20
2.7.1. <i>Remoção de Escuma nos Decantadores dos reatores UASB</i> .....	22
2.7.2. <i>Remoção de Escuma no Separador Trifásico</i> .....	23
2.8. TRATAMENTO ENZIMÁTICO .....	25
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>27</b>
3.1. COLETA E CARACTERIZAÇÃO DA ESCUMA .....	27
3.2. PRODUÇÃO DO POOL ENZIMÁTICO .....	28
3.3. TRATAMENTO DA ESCUMA (PRÉ-HIDRÓLISE ENZIMÁTICA) .....	29
3.4. TESTE DE BIODEGRADABILIDADE ANAERÓBIA .....	29
3.5. MÉTODOS ANALÍTICOS – PREPARO DAS AMOSTRAS E ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS .....	31
3.5.1. <i>pH</i> .....	31
3.5.2. <i>Demanda Química de Oxigênio</i> .....	31
3.5.3. <i>Sólidos Suspensos, Totais, Fixos e Voláteis</i> .....	31
3.5.4. <i>Óleos &amp; Graxas</i> .....	32
3.5.5. <i>Volume e Composição do Biogás</i> .....	33
3.5.6. <i>Proteínas</i> .....	33
3.5.7. <i>Carboidratos</i> .....	34
3.5.8. <i>Atividade Lipásica</i> .....	35
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>36</b>
4.1. ANÁLISE VISUAL DA ESCUMA E DO PROCEDIMENTO DE RETIRADA .....	36
4.2. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DA ESCUMA .....	36
4.3. TRATAMENTO ENZIMÁTICO .....	37
4.4. TESTE DE BIODEGRADABILIDADE ANAERÓBIA .....	38
<b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>41</b>
5.1. CONCLUSÕES .....	41
5.2. SUGESTÕES .....	41
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>42</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: ETAPAS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA (ADAPTADO DE MCLNERNEY E BRYANT, 1981, APUD SANT'ANNA JR, 2010).....	10
FIGURA 2.2: DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM REATOR UASB. ....	11
FIGURA 2.3: APARÊNCIA DA ESCUMA EM UM REATOR UASB. ....	13
FIGURA 2.4: FOTOMICROGRAFIAS DE <i>NOCARDIA ACTICNOMYCETES</i> (A) E <i>MICROTHRIX PARVICELLA</i> (B).....	15
FIGURA 2.5: LOCAIS ONDE OCORRE O ACÚMULO DA ESCUMA EM REATORES UASB. ....	18
FIGURA 3.1: REATOR UASB DE BANCADA USADO NESTE PROJETO, COM ESCUMA FORMADA NA SUPERFÍCIE. ....	28
FIGURA 3.2: CONDUÇÃO DO TESTE DE BIODEGRADABILIDADE ANAERÓBIA. ....	30
FIGURA 4.1: VOLUME DE BIOGÁS PRODUZIDO PARA CADA CONDIÇÃO AO LONGO DO TESTE. ....	39

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1. RESULTADOS DAS ANÁLISES DE MATÉRIA ORGÂNICA ESPECÍFICA PARA A ESCUMA DO DECANTADOR (SOUZA, 2006) .....	14
TABELA 3.1. CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE BRUTO ALIMENTADO NO REATOR UASB DE BANCADA. ....	27
TABELA 4.1. CARACTERÍSTICAS DA ESCUMA REMOVIDA DO REATOR UASB. ....	36
TABELA 4.2. DQO DA ESCUMA ANTES E APÓS O TRATAMENTO ENZIMÁTICO. ....	38
TABELA 4.3. COMPARAÇÃO DOS DADOS DO TESTE DE BIODEGRADABILIDADE COM ESCUMA SEM E COM PRÉ-HIDRÓLISE ENZIMÁTICA .....	38

# 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

## 1.1. INTRODUÇÃO

Nos processos de tratamento anaeróbio, o Reator de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente (UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor*) é capaz de suportar altas cargas orgânicas e a grande diferença, quando comparado com outros reatores de mesma geração, é sua simplicidade construtiva e os baixos custos operacionais. Por isso, o reator UASB constitui uma tecnologia de tratamento secundário de esgoto bastante consolidada no Brasil, com diversas estações de tratamento em escala plena em operação há vários anos (Souza, 2006; Chernicharo, 2007).

Ainda assim, existem alguns problemas associados ao processo, tais como o entupimento das tubulações de alimentação dos reatores (normalmente relacionados à deficiência no sistema de tratamento preliminar), geração de odores e ocorrência de corrosão (Chernicharo, 2007).

Um problema menos conhecido é a formação e acúmulo de espuma, que se constitui em uma camada de materiais flutuantes que se desenvolve na superfície de reatores anaeróbios. A espuma pode conter gordura, óleos, ceras, sabões, restos de alimentos, cascas de frutas vegetais, cabelo, papel, algodão, pontas de cigarro, materiais plásticos e materiais similares (Souza, 2006).

Sua formação é uma grande questão em estações de tratamento biológico de águas residuárias, nas quais causa sérios problemas de operação, aumenta o custo de manutenção e pode levar a má qualidade do efluente. É amplamente aceito que a formação e estabilização da espuma requer bolhas de gás, surfactantes e partículas hidrofóbicas. Os surfactantes estão presentes nas águas residuárias, mas também são produzidos pelos micro-organismos, e as partículas hidrofóbicas são micro-organismos ligados às bolhas. Micro-organismos como *Microthrix parvicella* e *Nocardioform actinomycetes* são encontrados frequentemente na espuma e acredita-se que tenham um papel importante na sua formação e estabilização (Hug, 2006).

Em reatores UASB, a formação de espuma pode ocorrer em dois locais distintos: no interior do separador trifásico e na superfície do decantador. Independente do lugar onde a espuma vier a se acumular, a quantidade e as suas características vão depender das características do esgoto afluente, em termos de presença de sólidos suspensos e de quantidade de óleos e graxas (Chernicharo, 2007).

Recomenda-se que a espuma seja retirada com uma frequência quinzenal e, dependendo das características de concentração e de quantidade, a frequência poderá ser reduzida ou ampliada. Somente a prática operacional do reator possibilitará estabelecer a melhor rotina de descarte de espuma (Chernicharo, 2007).

Uma vez determinada a necessidade de remoção de espuma, existem projetos de dispositivos para sua retirada que podem ser levados em consideração, variando de acordo as características da espuma (mais fluida ou mais sólida), sendo a retirada manual uma alternativa. A disposição da espuma também varia de acordo com essas características (Chernicharo, 2007).

Uma vez removida do reator, esta é normalmente descartada como resíduo sólido em aterros, dada sua elevada concentração de sólidos, em especial gorduras, havendo um enorme desperdício da energia contida na matéria orgânica presente na espuma (Chernicharo, 2007). Uma alternativa para o aproveitamento desta energia seria através da aplicação de enzimas hidrolíticas capazes de solubilizar a matéria orgânica, seguida da reintrodução do material hidrolisado no reator UASB, com o objetivo de aumentar a produção de metano.

## **1.2. OBJETIVOS**

Assim, este trabalho teve como objetivo geral levantar o estado da arte da formação de espuma nos reatores anaeróbios, em especial reatores UASB, e avaliar preliminarmente uma proposta de tratamento enzimático/biológico anaeróbio para a espuma gerada em um reator de bancada.

Para tal, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Realizar levantamento bibliográfico sobre a formação de espuma em sistemas de tratamento anaeróbio, abordando composição, problemas gerados e formas de tratamento;
- Determinar a composição físico-química da espuma acumulada em reator tipo UASB de bancada tratando efluente industrial com alto teor de gordura;
- Avaliar a hidrólise enzimática da espuma acumulada no reator UASB de bancada;
- Avaliar a biodegradabilidade anaeróbia da espuma com e sem uma etapa de pré-hidrólise.



## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. SISTEMAS ANAERÓBIOS DE TRATAMENTO**

O ponto principal dos processos biológicos anaeróbios de tratamento de esgoto doméstico e industrial é a capacidade dos micro-organismos presentes nos biorreatores transformarem os compostos orgânicos biodegradáveis em subprodutos solúveis, como hidróxidos, sulfatos, nitratos e fosfatos, que não apresentam demanda de oxigênio, insolúveis que possam ser removidos da fase aquosa, e gases como o metano ( $\text{CH}_4$ ), o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que podem ser aproveitados ou tratados (Chernicharo, 2007).

A conversão anaeróbia dos compostos orgânicos se dá em quatro estágios. No primeiro - a hidrólise, bactérias fermentativas hidrolíticas degradam substâncias orgânicas complexas em compostos mais simples. No segundo estágio - a acidogênese, bactérias acidogênicas transformam os produtos da hidrólise em ácidos voláteis (como fórmico, acético, propiônico, butírico, valérico). No terceiro estágio - a acetogênese, bactérias acetogênicas transformam todos os ácidos voláteis em acetato,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ . No quarto estágio - a metanogênese, a obtenção do metano se faz a partir da descarboxilação do acetato e/ou da redução do  $\text{CO}_2$  com  $\text{H}_2$  (Sant'Anna Jr, 2010). A Figura 2.1 apresenta as etapas de degradação de substâncias orgânicas presentes nos efluentes em meio anaeróbio.

Os sistemas anaeróbios são unidades bem estabelecidas para a biodegradação de material orgânico, porém, até recentemente, sua utilização para o tratamento de efluentes líquidos era considerada antieconômica e problemática (Chernicharo, 2007).

A implementação e a aplicação com sucesso dos sistemas anaeróbios se deu, principalmente, devido ao desenvolvimento dos “sistemas de alta taxa” (Van Haandel, 2006; Chernicharo, 2007). Tais sistemas são caracterizados pela capacidade de reter grandes quantidades de biomassa, de elevada atividade, sob baixos tempos de retenção hidráulica, além de manter elevados tempos de retenção de sólidos, mesmo com aplicação de elevadas cargas hidráulicas no sistema. O resultado são reatores compactos e com elevado grau de estabilização do lodo (Chernicharo, 2007).

Dentre os reatores de alta taxa mais utilizados estão o reator de leito fixo e o reator de leito fluidizado, os quais empregam materiais suportes fixos ou móveis, respectivamente, para adesão dos micro-organismos e formação de biofilme. Outros reatores muito utilizados são o reator de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB) e o reator anaeróbico de leito granular expandido (*expanded granular sludge blanket* – EGSB) nos quais a biomassa se desenvolve na forma de grânulos através de um processo de auto-imobilização (Van Haandel, 2006).

Como os reatores UASB são mais utilizados em estações de tratamento de esgoto doméstico e industriais (Chernicharo, 2007), e a escuma de que trata esse trabalho é formada em um reator UASB, esta configuração será melhor detalhada a seguir.

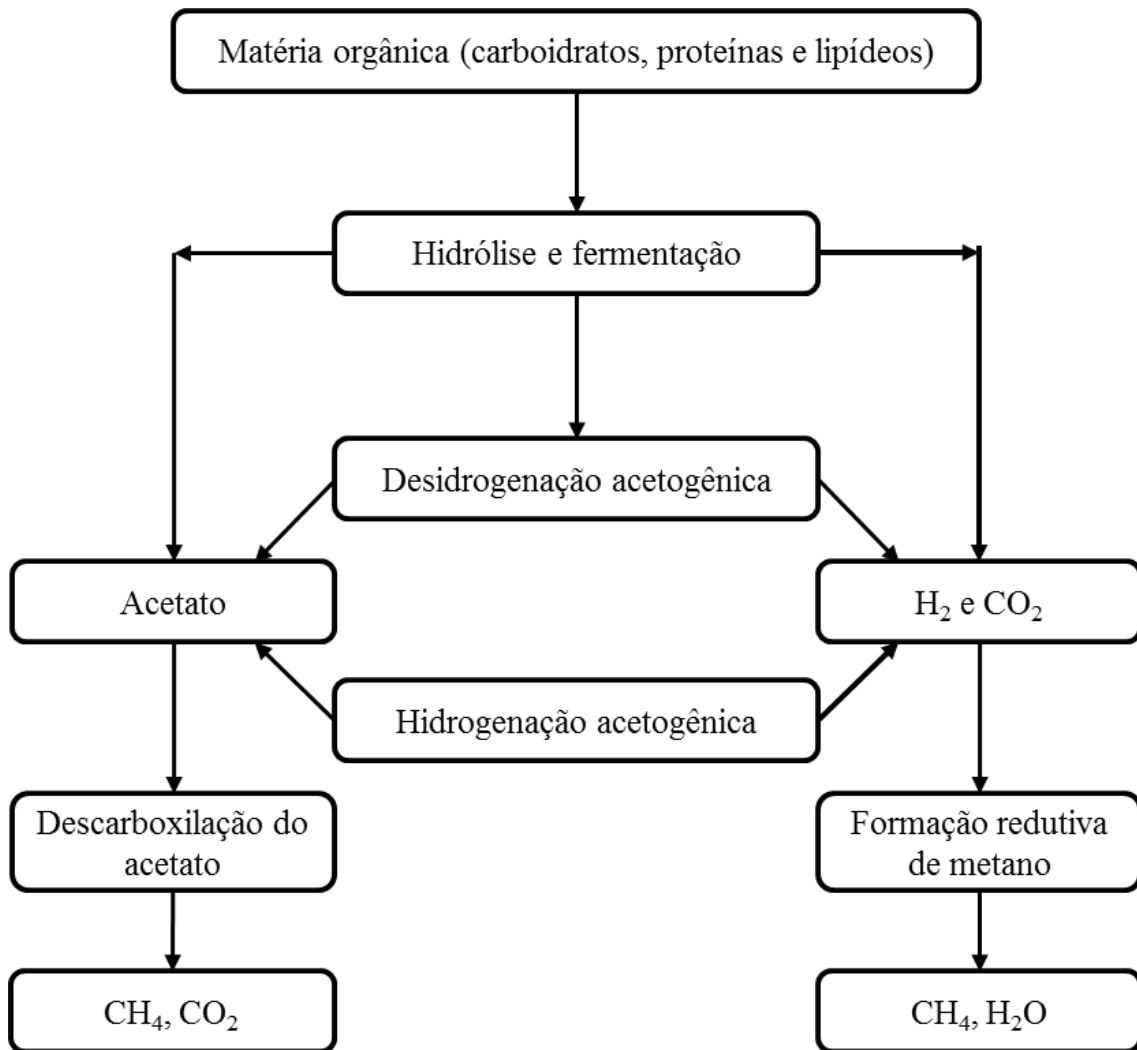


Figura 2.1: Etapas da digestão anaeróbica (adaptado de MCLNERNEY e BRYANT, 1981, *apud* SANT'ANNA JR, 2010).

## 2.2. REATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE E MANTA DE LODO

A aplicação de um sistema anaeróbico como etapa principal no tratamento de efluentes era rara até o desenvolvimento do reator UASB, por Lettinga e seu grupo nos anos 70, na Holanda (Van Haandel, 2006).

Com mais de 850 instalações em escala industrial no mundo, tratando uma vasta gama de efluentes (Kleerebezem e Macarie, 2003), o reator UASB é, de longe, o reator de alta taxa mais popular. Especialmente em países de clima quente, que permitem sua utilização com maiores vantagens, os reatores UASB surgiram como uma alternativa bastante competitiva aos processos tradicionais de tratamento, ganhando larga aplicação devido aos seus baixos custos de implantação, operação e manutenção, possibilitando o processamento de grandes cargas de matéria orgânica (Van Haandel e Lettinga, 1994; Chernicharo, 2007).

Geralmente, a estrutura dos reatores biológicos é baseada na alta eficiência de remoção de matéria orgânica biodegradável. Consequentemente, se a composição do efluente é conhecida, a estrutura básica de um sistema anaeróbico de alta taxa pode ser estabelecida (Van Haandel, 2006). O reator UASB (Figura 2.2) é baseado nos seguintes conceitos (Lettinga et al., 1984 *apud* Van Haandel, 2006): a manta de lodo anaeróbico possui boas propriedades de sedimentação, logo, não há necessidade de agitação; o contato necessário entre a manta de lodo e o efluente se dá pelo fato de a alimentação deste ser feita pela parte inferior do reator e pela produção de biogás; a eliminação de biomassa pode ser prevenida usando um separador trifásico (gás-sólido-líquido) no topo do reator.

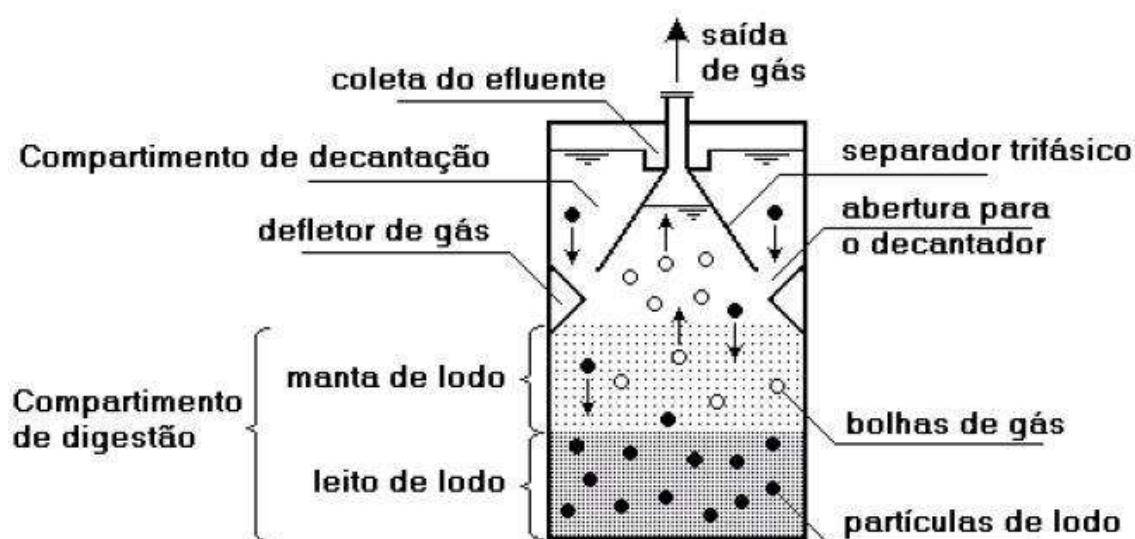


Figura 2.2: Desenho esquemático de um reator UASB.

O efluente é distribuído homogeneamente na parte de baixo do reator e flui para cima, através da manta de lodo, onde reações bioquímicas ocorrem, transformando os poluentes orgânicos em biogás (uma mistura de metano e dióxido de carbono) (Van Haandel, 2006).

O biogás, junto com o fluxo ascendente, permite uma boa mistura de lodo e efluente na manta de lodo. Grânulos menores e sólidos suspensos fluem para o topo do reator onde a biomassa decanta e retorna para a manta de lodo, enquanto o biogás é coletado no separador trifásico (Kleerebezem e Macarie 2003).

Os reatores UASB apresentam amplas vantagens, tais como: alta eficiência de remoção de matéria orgânica; capacidade de suportar altas cargas orgânicas; operam com baixos tempos de retenção hidráulica; e possuem biomassa granular o que dispensa o uso de meio suporte (Chernicharo, 2007).

No entanto, algumas desvantagens ainda são atribuídas aos reatores UASB, como a possibilidade de emanar de maus odores, a baixa capacidade do sistema em tolerar cargas tóxicas, o elevado intervalo de tempo necessário para a partida do sistema, a necessidade de uma etapa de pós-tratamento, a dificuldade para tratar efluentes com elevadas concentrações de sólidos e a formação de espuma. (Lettinga e Hulshoff Pol, 1991; Foresti et al., 2006; Van Haandel, 2006; Chernicharo, 2007).

Para melhor entender o impacto negativo causado pela espuma, precisa-se primeiro defini-la. Após isso, pode-se observar sua ocorrência em reatores UASB, os problemas por ela causados e os fatores que influenciam na formação, acúmulo e constituição do material.

### **2.3. DEFININDO A ESCUMA**

Existem diferentes definições para espuma, variando de acordo com o efluente tratado, mas todas concordam que espuma é uma camada de materiais que flutuam na superfície dos reatores (Metcalf & Eddy, 1991; Gerardi, 2003; Souza, 2006; Chernicharo, 2007).

"Espuma" significa uma camada de impurezas ou outro material sobre a superfície de um líquido (Hug, 2006). Chernicharo (2007) define espuma como uma camada de materiais flutuantes que se desenvolve na superfície de reatores anaeróbios e suas características dependem do esgoto afluente, em termos de presença de sólidos suspensos e da quantidade de óleos e graxas, podendo ser mais líquida ou mais sólida.

Souza (2006), citando Metcalf & Eddy (1991), define espuma como uma variedade de materiais flutuantes, como vegetais, gorduras e óleos minerais, gorduras animais, ceras,

sabões, restos de comida, cascas de vegetais e frutas, papel e algodão, cabelo, pontas de cigarros, materiais plásticos, partículas de areia e materiais similares. Além disso, sua concentração de sólidos varia amplamente e sua massa específica é menor do que 1, normalmente  $0,95 \text{ g/cm}^3$ .

De acordo com Gerardi (2003), a espuma é composta de materiais flutuantes com uma massa específica menor do que  $1,0 \text{ g/cm}^3$ , por isso são levados à superfície do reator impulsionados por bolhas de gás. Materiais tais como gorduras e óleos vegetais, materiais plásticos, cabelo e borracha formam a camada de espuma.

Em reatores UASB, a espuma aparece como uma espessa camada gelatinosa contendo partículas de detritos, lodo granular morto e outras partículas finas, que tendem a ser extremamente pegajosas e oleosas (Figura 2.3). A espessura da camada de espuma encontrada depende da composição da alimentação do reator, e não é consequência das mudanças de biomassa ou de desempenho do reator, já que um reator UASB tratando efluente da destilação de cereais apresentou a formação de uma camada de espuma, enquanto com efluente da produção de vinho, a camada não foi observada (Laubsher et al., 2001).



Figura 2.3: Aparência da espuma em um reator UASB.

É possível perceber que a espuma possui diferentes definições e se constitui de diversos materiais, por isso é bastante heterogênea e não existem metodologias específicas para caracterizá-la. Isto dificulta uma comparação dos dados da literatura, até porque sua

constituição físico-química, as taxas de acúmulo e a biodegradabilidade do material ainda não são bem conhecidas (Souza, 2006).

No estudo feito por Souza (2006) que caracterizou a espuma de dois reatores diferentes (R1 e R2), um submetido a uma etapa prévia de peneiramento forçado e o outro sem essa etapa, as concentrações totais de proteína, lipídeo e carboidrato da espuma do R1 e do R2 indicaram um predomínio de lipídeos sobre os outros constituintes. O cálculo da DQO relativa a cada constituinte se deu com base nos coeficientes empíricos 1,1 gDQO/gProteína, 1,6 gDQO/gLipídeo e 1,6 gDQO/gCarboidrato (Aquino et al., 2006). Por fim, determinou-se a percentagem da DQO total de cada constituinte, reforçando que a maior porcentagem da DQO da espuma é proveniente de material lipídico.

Tabela 2.1. Resultados das análises de matéria orgânica específica para a espuma do decantador (Souza, 2006)

	R1			R2		
	mg/L	mgDQO/L	%DQO total	mg/L	mgDQO/L	%DQO total
Proteína Total	19470	21417	20	20606	22667	16
Lipídeo Total	28783	46053	43	26033	41653	30
Carboidrato Total	14785	23656	22	13448	21517	15
Total		91126	85	Total	85836	61

## 2.4. O PROCESSO DE FORMAÇÃO DA ESCUMA

É aceito que a formação de espuma requer bolhas de gás, surfactantes e partículas hidrofóbicas (Hug, 2006). As bolhas de gás presentes no sistema anaeróbio podem ficar aprisionadas na espuma e por isso esta seria levada à superfície, o que pode ocorrer em menor grau ou até não ocorrer, não sendo determinante na sua produção. Em digestores anaeróbios camadas de espuma podem se formar durante o *start-up* ou em um sistema maduro (Gerardi, 2003).

Os surfactantes podem estar presentes no efluente, mas também são produzidos pelos micro-organismos. Mesmo em baixa concentração de surfactantes, materiais como óleos, graxas, gorduras, materiais vegetais particulados, cabelos e borrachas, com degradação mais demorada, tendem a flutuar naturalmente em direção à superfície, formando a espuma. Sua velocidade de ascensão pode variar influenciada por correntes de gases biológicos ou por correntes hidráulicas (Hug, 2006).

As partículas hidrofóbicas são micro-organismos anexados às bolhas. Micro-organismos como *Microthrix parvicella* e *Nocardioform actictinomycetes* (Figura 2.4) são espécies microbianas muito encontradas na formação de espuma em estações de tratamento de esgoto; logo, presume-se que estas bactérias têm um importante papel na formação e estabilização da espuma (Hug, 2006).

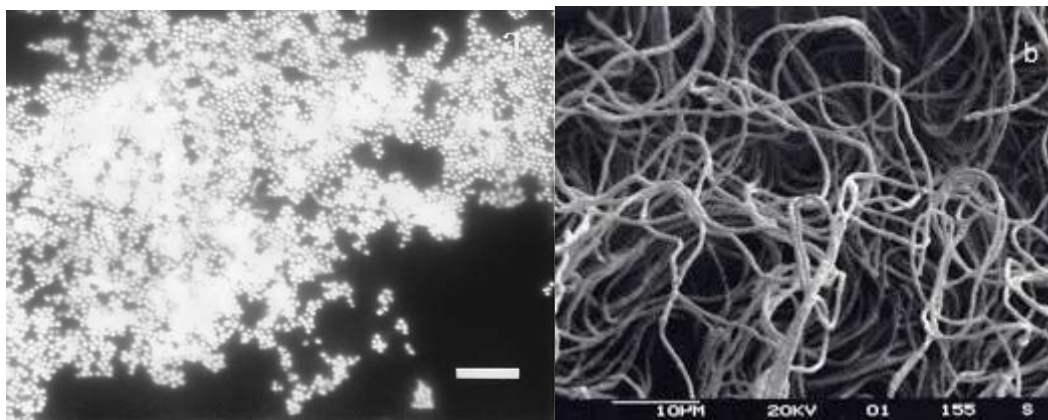


Figura 2.4: Fotomicrografias de *Nocardioform actictinomycetes* (a) e *Microthrix parvicella* (b).

Sob algumas condições, uma espuma marrom viscosa acumula na superfície do biorreator do sistema de lodos ativados. Segundo Jenkins et al. (2004) e Tandoi et al. (2006), citados por Grady et al. (2011) esta espuma é causada pelo crescimento de actinomicetos como *Gordonia* e bactérias filamentosas como a *Microthrix parvicella*. Quando os sólidos removidos desses sistemas de lodo ativado, que contém quantidades significativas de micro-organismos que causam espuma são enviados aos digestores anaeróbios para estabilização os micro-organismos retêm suas características e integridade física causando assim a espuma no digestor anaeróbio.

Segundo Hug (2006), existem muitos estudos e conhecimento empírico sobre a ocorrência destes micro-organismos e a formação de espuma. Em algumas estações de tratamento, a formação de espuma foi relacionada com o número de *M. parvicella* (Hwang e Tanaka, 1998; Miana et al., 2002 *apud* Hug, 2006). Em outros estudos, no entanto, *Nocardioform actinomycetes* pareciam ser os micro-organismos responsáveis (Davenport et al., 2000; de los Reyes III e Raskin, 2002 *apud* Hug, 2006).

Com um método de quantificação rápida, Hug (2006) foi capaz de acompanhar a variação sazonal dessas bactérias, chegando ao resultado de que a camada de espuma foi parcialmente relacionada a tipos de *Nocardioform actictinomycetes*, mas não de *M. parvicella*. No entanto, não é possível explicar toda a variabilidade da formação de espuma.

O estudo desenvolvido por Hug (2006) confirmou que a formação de espuma não é controlada somente pela abundância de um determinado micro-organismo ou por um parâmetro operacional. Uma combinação de fatores ainda não conhecidos controla a formação e estabilização da espuma. Por isso, para investigar as causas da formação de espuma não é suficiente caracterizar o lodo e as condições operacionais uma única vez, mas sim um sistema de monitoramento incluindo diferentes períodos de intensidade de formação de espuma e época do ano.

Mais pesquisas são necessárias para compreender os mecanismos de formação da espuma. É importante pesquisar os fatores que causam sua rápida produção e esclarecer o papel de outras bactérias neste processo (Hug, 2006).

O aparecimento de espuma em reatores UASB, no tratamento de esgotos domésticos, também pode ser associado à presença de materiais flutuantes no afluente, à concentração de lipídios, às variações de temperatura, à mistura insuficiente, e à flotação e idade do lodo (Halalsheh et al., 2005, Souza, 2006).

De acordo com Halasheh (2005), tanto temperatura quanto tempo de retenção celular afetam a formação de espuma. O potencial de formação de espuma diminui com o aumento do tempo de digestão, da temperatura ou da idade do lodo, o que por sua vez afeta a concentração de lipídeos, que tendem a adsorver partículas do lodo e flutuar.

Foi observado que o potencial de formação de espuma diminui em reatores operados a 25°C, mas com os operados a 15°C essa diminuição só ocorreu depois de 30 dias. Também se pode notar que o potencial de formação de espuma aumenta com a diminuição do pH da solução (Halasheh et al, 2005).

No estudo feito por Souza (2006) foi avaliado o efeito das condições operacionais na formação de espuma em dois reatores UASB. Os reatores eram idênticos, porém um possuía uma unidade de peneiramento forçado para reduzir o tamanho médio das partículas no efluente. O tempo de retenção hidráulico foi de 5h, 7h e 9h, com velocidade do fluxo líquido de 1,1 m/h, 0,7 m/h e 0,5 m/h, respectivamente. Em todos os casos ocorreu formação de espuma, entretanto, com o tempo de retenção hidráulica de 5h, o autor observou uma formação de espuma maior no reator com peneiramento. Isso ocorreu devido à alta velocidade do fluxo, que carrega muitos sólidos; com o decorrer do tempo o mesmo aconteceu com o reator sem peneiramento. Logo, o arraste de lodo biológico do compartimento de digestão para o compartimento de decantação, devido à imposição de elevadas velocidades ascensionais, gera mais espuma (Souza, 2006). Com relação à comparação dos reatores alimentados com e sem peneiramento, os resultados de Souza (2006) são contraditórios, pois



esperava-se que a retenção de sólidos suspensos na peneira reduzisse a formação de espuma no reator.

Outra razão para a produção de espuma em reatores UASB é a adsorção de ácidos graxos de cadeia longa, resultantes da hidrólise de lipídeos, sobre o lodo granular (Hwu, 1998).

Chega-se à conclusão de que alguns elementos essenciais para a formação de espuma são líquidos com altas concentrações de óleos e graxas, gorduras e materiais particulados, além da elevada produção de gases e intensos fluxos hidráulicos.

## **2.5. ACÚMULO DE ESCUMA**

De acordo com Chenicharo (2007), em reatores UASB, após a formação de espuma, esta pode acumular em dois locais distintos, no interior do separador trifásico, interface de liberação dos gases formados durante a digestão anaeróbia, e na superfície do decantador (Figura 2.5).

A espessura da camada de espuma acumulada em reatores UASB depende fundamentalmente da composição do substrato, notadamente do conteúdo de sólidos suspensos e de óleos e graxas (Chernicharo, 2007).

Materiais leves e de pequenas dimensões, não removidos nas unidades de tratamento preliminar, passam a constituir a camada de espuma que se acumula no separador trifásico e na superfície do decantador (Pagliuso, 2002).

No caso de reatores tratando esgotos mais diluídos, a quantidade de espuma formada tanto no interior do separador trifásico quanto na superfície do decantador tende a ser relativamente pequena (Chernicharo, 2007).

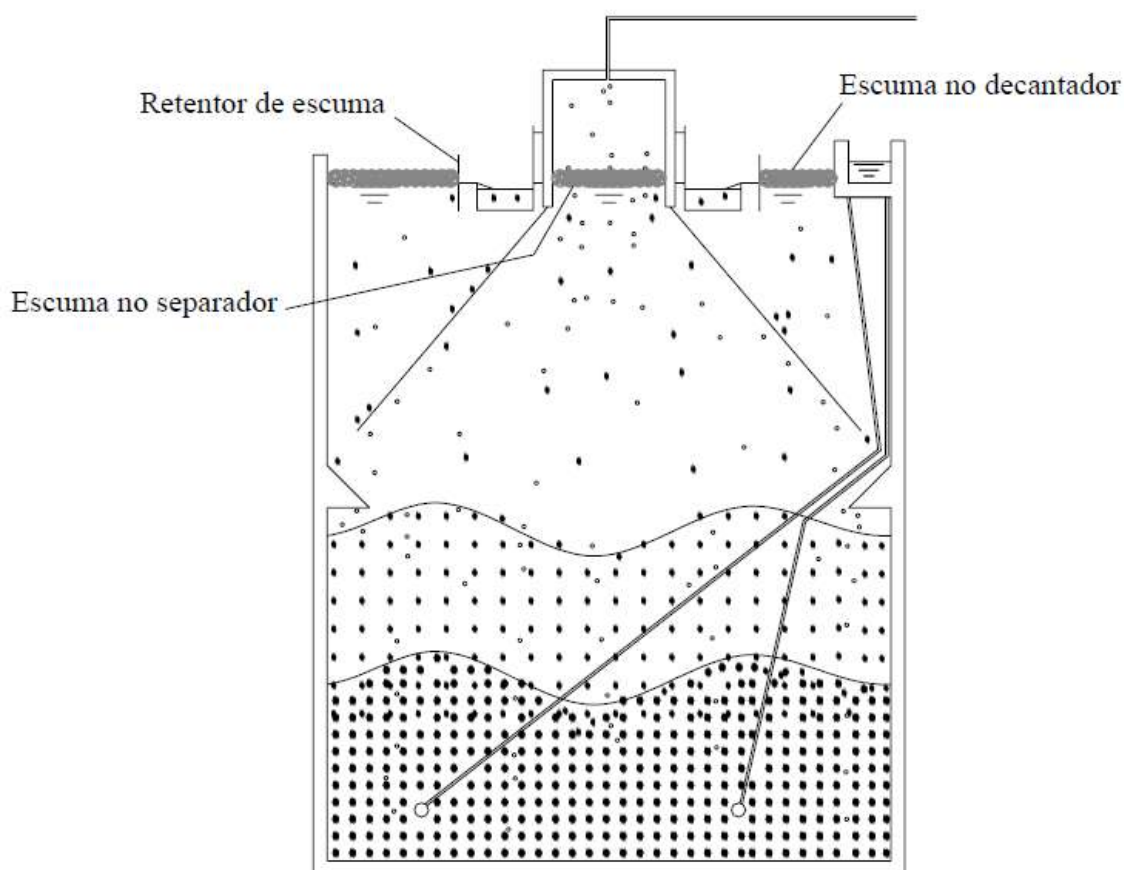


Figura 2.5: Locais onde ocorre o acúmulo da espuma em reatores UASB.

Por se tratar de uma subunidade fechada e de difícil acesso, o separador trifásico mostra-se um local favorável à formação e acúmulo de espuma. Entretanto, essas características dificultam os relatos. Segundo estudos de Van Haandel e Lettinga (1994), observou-se a formação de uma camada grossa de espuma nesta parte do reator.

Já a taxa de acúmulo de espuma nos decantadores dependerá fortemente do correto gerenciamento do lodo no interior do reator, das características do esgoto bruto e das condições hidrodinâmicas do reator. Um reator com uma boa mistura é a chave para o combate ao acúmulo da camada de espuma (Moen, 2003; Chernicharo, 2007).

A espuma acumulada em decantadores de reatores UASB é um resíduo muito concentrado, mas apresenta taxas de acúmulo muito baixas (Souza, 2006). E só ocorrerá se o reator estiver equipado com retentores de espuma ou caso a coleta do efluente final seja realizada por tubulação perfurada ou calha afogada. Se a coleta do efluente for livre, sem retentores, o material flutuante será descarregado junto com o efluente. (Van Haandel e Lettinga, 1994; Chernicharo, 2007).

## 2.6. PROBLEMÁTICA DA FORMAÇÃO E ACÚMULO DE ESCUMA

A formação e acúmulo de espuma são sérios problemas nas estações de tratamento de efluentes, atrapalhando o processamento do efluente, causando falhas operacionais, elevando o custo de manutenção e diminuindo a qualidade deste.

De acordo com Souza (2006), citando Raman et al. (1989), o problema da espuma gerada nos digestores anaeróbios é a produção desuniforme de biogás, o que possibilita entupimento de tubulações de saída e conseqüente acúmulo de gás em espaços do reator projetados como volume de digestão.

O desempenho das estações de tratamento com reatores UASB pode ser prejudicado pela falta de correta remoção da espuma, como afirmam Sato et al. (2005) em seus estudos na Índia.

Como dito anteriormente, a espuma acumulada nos decantadores de reatores UASB sem retentores tende a se perder junto com o efluente, gerando um efluente tratado de baixa qualidade. Os retentores, então, evitariam que a espuma fosse descarregada com o efluente. Porém, em um estudo conduzido na Índia, concluiu-se que, naquelas condições, não houve grande vantagem em utilizar o retentor, notando-se apenas uma pequena melhoria na qualidade do efluente (Van Haandel e Lettinga, 1994).

Por outro lado, os retentores causam o aumento do acúmulo de espuma nos decantadores, formando uma camada mais espessa, que pode levar ao desprendimento dos sólidos se a capacidade do retentor for ultrapassada, comprometendo a qualidade do efluente (Souza, 2006).

Segundo Laubscher et al. (2001), pode-se reduzir a quantidade de espuma ao realizar a pré-remoção de sólidos do efluente, mas ainda assim não é possível eliminá-la. Neste estudo foi avaliada visualmente a produção de espuma tratando dois efluentes distintos, um da produção de vinho e outra da produção de cereais. A formação de espuma no reator UASB tratando o efluente da produção de cereais foi muito maior, gerando uma camada mais espessa de espuma que, mesmo com os retentores, conseguiu prejudicar a qualidade do efluente final. Na ocasião, o desenvolvimento da camada de espuma foi tão grave que obrigou o desligamento operacional do sistema UASB para a remoção física da camada.

Quando ocorre dentro do separador trifásico, a formação de espuma é considerada ainda mais problemática. Em efluentes como esgotos domésticos, a possibilidade de formação de espuma neste compartimento do reator pode impedir a liberação do biogás. Assim, ele

seguiria para a zona de decantação levando junto partículas de lodo, depreciando o efluente (Lettinga e Hulshoff Pol, 1991).

Apesar de ser uma característica dos reatores UASB e um fator importante no tratamento do efluente, a taxa de liberação de gases, quando muito elevada, pode tornar-se prejudicial. Dentre os danos ao processo, destaca-se o entupimento na tubulação de saída de gases, causado por sólidos presentes na espuma que chegam até os dispositivos de remoção (Van Haandel e Lettinga, 1994; Chernicharo, 2007).

Mais um fator problemático é o espaço ocupado pela camada de espuma dentro do reator por conta de acúmulo desordenado, que resulta em perda de volumes relevantes para o processo. No estudo conduzido por Santos et al. (2003) notou-se que a unidade perdeu aproximadamente três centímetros por mês de sua altura útil.

Em contrapartida, pode-se destacar a importância da espuma no controle de odores gerados no reator, beneficiando sistemas construídos com compartimento de decantação exposto à atmosfera (Souza, 2006).

Assim, a espuma necessita de adequado gerenciamento, remoção e disposição final.

## **2.7. MÉTODOS DE CONTROLE E REMOÇÃO DA ESCUMA**

A remoção da espuma é, sem dúvida, o procedimento operacional mais problemático atualmente associado ao reator UASB. Deste modo, antes de discutir sistemas para remoção de espuma, deve ser salientado que a prevenção da formação de espuma é mais importante que medidas reparadoras. Como a formação de espuma é associada com, entre outros, a presença de óleos, graxas e gorduras, cabelos e fibras, deve-se tentar remover esses materiais no início do sistema.

O controle da formação de espuma no separador trifásico, de onde a mesma não pode sair, representa uma vantagem operacional, assim como, uma boa forma de equacionamento do problema. (Souza, 2006).

Segundo Lettinga e Hulshoff Pol (1991), devem ser previstos mecanismos de agitação na região de formação de espuma, como medida de controle. Moen (2003) também destaca que o mecanismo fundamental de controle é promover uma adequada mistura da camada de espuma, promovendo a sua dispersão de tal forma que impossibilite a formação de camadas mais solidificadas.

No entanto, em um reator UASB tratando esgotos domésticos, no qual a liberação do biogás ocorre de forma intermitente, haverá a possibilidade de formação de escumas mais densas pela falta de agitação contínua. Se não há mecanismos de agitação, a única alternativa de controle é a retirada periódica da espuma, que se traduz em mais uma demanda operacional dos reatores UASB (Chernicharo, 2007).

Para definir a frequência da remoção da espuma, somente a prática operacional do reator possibilita estabelecer uma melhor rotina de descarte, já que devem ser consideradas as características de concentração e quantidade da mesma. É recomendável que a frequência de remoção não seja muito espaçada no tempo, com intervalos próximos de 30 dias (Chernicharo, 2007).

Uma vez determinada a necessidade de remoção de espuma, existem projetos que podem ser levados em consideração, como a incorporação de calhas coletoras no interior do separador trifásico, usadas para remover escumas mais fluidas. No caso de uma espuma mais solidificada, com elevado teor de sólidos, a remoção pode ser feita de forma manual através de escotilhas, com auxílio de uma “escumadeira”, ou por meio de um mangote de sucção. A retirada manual só é uma opção nos casos em que a quantidade acumulada seja relativamente pequena. Dependendo da consistência e do grau de estabilização da espuma, ela poderá ser disposta diretamente em aterro sanitário, no caso de uma espuma mais solidificada, ou em um leito de secagem para processamento junto com o lodo, para uma espuma mais fluida (Chernicharo, 2007).

Segundo Souza et al. (2006), embora a espuma seja sempre relatada como um sério problema operacional, poucos estudos foram focados no equacionamento do problema e as informações sobre o assunto são escassas.

Metcalf & Eddy (1991) citam algumas formas de resolver o problema. A espuma pode ser coletada no efluente final em tanques retangulares, com o retorno do líquido para a superfície, a espuma é movida para um ponto em que fica presa por defletores antes de sua remoção. Pulverizadores de água também podem remover a espuma. Outros métodos de remoção são a raspagem manual e a remoção mecânica ou hidráulica.

O mecanismo mais comum de remoção de espuma consiste de um tubo, com fenda horizontal, que pode rodar por meio de uma alavanca ou de um parafuso. Exceto quando está coletando a espuma, o *slot* aberto está acima do nível normal de água do tanque. Ao coletar a espuma, o tubo é rodado de modo a que a ranhura aberta é submersa abaixo do nível da água, permitindo que a espuma flua para dentro do tubo. A utilização deste equipamento resulta em uma quantidade relativamente grande de licor de espuma (Metcalf & Eddy, 1991).

A remoção de espuma também pode ser feita por um limpador helicoidal transversal rotativo ligado a um eixo. A espuma é removida da superfície e movida para uma calha de coleta. Desta calha, o material indesejável pode ser ejetado ou bombeado para fora (Metcalf & Eddy, 1991).

Outro método de remoção de espuma é constituído por um tipo de coletor (tipo "chain-and-flight") que coleta o material em um lado do tanque e raspa-o, por um pequeno aclave, até funis de espuma, de onde esta pode ser bombeada para unidades de eliminação. Esse material também pode ser recolhido por ancinhos especiais de espuma em tanques retangulares. Em instalações em que grandes quantidades de espuma são recolhidas, os funis de espuma são geralmente equipados com misturadores para proporcionar uma mistura homogênea antes de bombear. Normalmente, ela é eliminada juntamente com os sólidos e biossólidos produzidos na planta; no entanto, a mistura separada é usada em muitas plantas (Metcalf & Eddy, 1991).

Para que a formação de espuma não atrapalhe o bom funcionamento da estação, é indispensável o treinamento e experiência dos operadores, ao determinarem os intervalos de descarte (Sato et al., 2005).

A espuma não deve ser devolvida para a planta porque micro-organismos responsáveis pela sua formação (tipicamente *Nocardia*) serão reintroduzidos no meio. Em algumas plantas, a espuma é descarregada para instalações de espessamento de lodo (Metcalf & Eddy, 1991).

### **2.7.1. Remoção de Espuma nos Decantadores dos Reatores UASB**

Mesmo que a acúmulo de espuma nos compartimentos de decantação ocorra em taxas usualmente baixas e que a liberação da espuma, juntamente com o efluente, não implique em deterioração da qualidade do efluente, deve ser avaliado o uso de retentores de espuma em reatores UASB.

Os retentores podem ser usados no caso do tratamento de esgotos muito concentrados ou quando o sistema de pós-tratamento envolve mecanismos de filtração; porém, o projeto deve prever mecanismos de remoção da espuma acumulada. Uma possibilidade é a utilização de uma canaleta lateral, que possibilita a remoção e o esgotamento da espuma por meio da elevação do nível operacional do reator (Chernicharo, 2007).

Souza et al. (2006) mostraram que a produção de espuma nas condições latino americanas é na verdade bem pequena, aproximadamente 0,011kg / kg DQO aplicada. Logo,

a instalação de defletores de espuma só é necessária se o reator UASB for o único meio de tratamento, ou quando é seguido por uma série de reservatórios, onde a espuma pode se acumular, causar problemas como odor, e seja de difícil remoção.

Pode-se deixar uma camada grossa e viscosa de espuma formar-se por aproximadamente 3-4 meses até que chegue ao ponto que possa ser manualmente removida usando pás e carrinhos de mão. O sistema é efetivo, apesar dessa função desagradável e intensa.

Outra alternativa é instalar cavidades de remoção de espuma a cada 2-3 metros na seção de decantação. As cavidades são ligadas a uma válvula de escape, que, quando aberta, permite à espuma na superfície da seção de decantação, ser drenada e enviada à unidade de pós tratamento. O retorno da espuma ao reator UASB não é recomendado, pois resultará em um novo acúmulo de espuma (Fang, 2005).

### **2.7.2. Remoção de Espuma no Separador Trifásico**

A remoção de espuma da câmara de gás é indiscutivelmente uma tarefa ainda mais difícil. Vários métodos já foram implementados para esse fim, cada um com diferentes níveis de sucesso. Um método comumente usado é a remoção periódica da espuma acumulada através de pontos de acesso instalados em intervalos regulares ao longo do separador trifásico. Existem diversas desvantagens neste método:

- os pontos de acesso são tão pequenos que a remoção de espuma é muito difícil, trabalhosa e com resultados parciais, na melhor das hipóteses.

- é difícil selar hermeticamente os pontos de acesso após o uso. Isso é essencial, caso contrário o biogás pode escapar para o ambiente, resultando em questões ambientais e de segurança.

- por fim, caso a câmara de gás não esteja hermeticamente fechada, é impossível operar a câmara de gás com a pressão necessária (15-40 mbar) para permitir o transporte do biogás produzido para a usina de tratamento sem o uso de ventilador ou compressores (Fang, 2005).

De acordo com Chernicharo, 2007, para a espuma acumulada no interior dos separadores trifásicos, o projeto deve prever pontos de inspeção e também algum dispositivo para a sua remoção. Podem ser utilizadas canaletas fixas na parte superior e longitudinal dos

separadores trifásicos, de forma a possibilitar o escoamento da espuma para o exterior do reator.

Se a espuma apresenta características fluidas é possível uma remoção hidrostática por meio de canaletas e tubulações, mas no caso de uma espuma mais concentrada podem ser utilizadas escotilhas de inspeção, perfeitamente herméticas, localizadas na parte superior da câmara de gás dos separadores trifásicos (Chernicharo, 2007).

Schellinkhout e Collazos (1992) também destacam a importância da retirada da espuma, e ainda sugerem adaptações como injeção de gás sobre a camada de espuma. Os autores destacam que a espuma pode ser degradada se houver boa mistura, e, caso contrário, deve haver dispositivos para sua retirada do interior do separador.

Recentemente, Chernicharo et al. (2009) propuseram um novo sistema utilizando pressão de gás auto-generativa na câmara de gás. O mecanismo básico baseia-se na redução e aumento sequenciais de pressão na câmara de gás para facilitar a remoção da espuma através de barragens instaladas na caixa de gás. Resultados excelentes em condições piloto pedem teste em escala industrial. A espuma drenada pode ser desviada para a etapa de pós tratamento ou para o despejo.

Peña et al. (2006) relatam que a região no interior do separador em geral pode ser uma zona estagnada do reator, ficando a mistura desta região dependente da baixa produção de gases, facilitando o acúmulo e a agregação da camada de espuma (Van Haandel e Lettinga, 1994). Assim, a mistura nesta região pode ser um ponto chave no controle da formação de espuma no separador trifásico.

A produção de espuma em digestores anaeróbios também é um grave e frequente problema. Algumas medidas consideradas de controle e remoção são: o controle de temperatura, manter estável sem variações maiores que 2°C; uma agitação adequada; um clarificador primário; e até a remoção manual (Gerardi, 2003).



## 2.8. TRATAMENTO ENZIMÁTICO

Conforme apresentado no item 2.3, a espuma acumulada na superfície de reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico e efluentes industriais contém quantidades consideráveis de gordura. Assim, a espuma retirada do reator poderia ser submetida a um tratamento com enzimas hidrolíticas e reintroduzida no reator para mais uma oportunidade de degradação e produção de biogás.

Uma alternativa interessante para contornar os problemas operacionais decorrentes do acúmulo de gordura nos biorreatores e os elevados custos dos processos físico-químicos que já vem sendo estudada é a utilização de enzimas hidrolíticas no pré tratamento destes efluentes, auxiliando na etapa da hidrólise e facilitando o acesso dos micro-organismos aos substratos.

Enzimas são consideradas catalisadores naturais (Hasan et al., 2005), apresentando características peculiares que favorecem seu emprego em processos biotecnológicos e relevantes vantagens em conversões enzimáticas nos processos industriais. Toda enzima, em razão da sua grande especificidade, catalisa as transformações moleculares sem ocorrência de reações paralelas indesejáveis, comuns em sínteses químicas.

No processo de tratamento de efluentes, as enzimas não podem representar elevação significativa dos custos do processo. Tendo em vista este fato, a utilização de preparações comerciais é economicamente inviável, visto que apresentam custo elevado. Dessa forma, é crescente a busca de alternativas de baixo custo e viáveis para a produção de enzimas como, por exemplo, a produção através do processo de fermentação em estado sólido (Castilho et al., 2000).

As lipases constituem um importante grupo de enzimas associadas ao metabolismo e hidrólise de triglicerídeos de cadeia longa. Esta classe de biocatalisador é encontrada em vegetais, animais e em micro-organismos (Treichel et al., 2010). As lipases microbianas estão recebendo muita atenção com o rápido desenvolvimento da tecnologia enzimática. Segundo Hasan et al. (2005), as lipases constituem o grupo mais importante de biocatalisadores para aplicações biotecnológicas.

As lipases são utilizadas nas indústrias de detergentes e alimentícias (reações de hidrólise), na indústria farmacêutica, de química fina, de cosméticos, de óleos e gorduras, de couro, de polpa e papel, em aplicações biomédicas, em biossensores e até mesmo no tratamento de efluentes industriais (Saxena et al., 2003).

Assim como a espuma, efluentes de indústrias alimentícias são ricos em gorduras e proteínas (moléculas orgânicas) que são lentamente biodegradadas. Altos teores de lipídeos nos efluentes causam grande impacto ambiental porque estes criam filmes na superfície da água, impedindo a transferência de oxigênio do ar atmosférico para a água e causando a morte de muitos organismos aquáticos (Cammarota e Freire, 2006).

Existem muitos estudos com bons resultados sobre o pré-tratamento enzimático de efluentes industriais com alto teor de lipídeos. Desta forma, neste trabalho, a espuma, por apresentar um alto teor de óleos e graxas, foi tratada como tal. Por este motivo, foi selecionado o *pool enzimático* produzido pelo fungo filamentosso *Penicillium brevicompactum* que apresenta uma alta atividade lipásica, para realizar o tratamento.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. COLETA E CARACTERIZAÇÃO DA ESCUMA

A espuma utilizada neste estudo foi coletada em reator do tipo UASB de bancada alimentado com efluente bruto da indústria aviária (Figura 3.1), cujas características são apresentadas na Tabela 3.1 abaixo.

Tabela 3.1. Características do efluente bruto alimentado no reator UASB de bancada.

Parâmetros	Valor (mg/L)
DQO (mg/L)	5231 ± 506
pH (entrada)	6,5 ± 0,2
pH (saída)	7,6 ± 0,4
O&G	1243
SST (mg/L)	1308
Temperatura (°C)	30

O reator UASB era constituído de um tanque cilíndrico vertical, em acrílico, de fluxo ascendente, com 1,08 L de volume útil, sendo a alimentação introduzida na base do reator através de bomba peristáltica. Para melhor distribuição da alimentação, a base do reator foi preenchida com uma camada de 3 cm de esferas de cerâmica com 0,8 cm de diâmetro médio. O topo do reator era equipado com um separador trifásico sólido-líquido-gás constituído de um funil invertido com inclinação a 30°.

O reator foi operado a 30°C por 143 dias, com vazão de alimentação em torno de 1,3 litros por dia, correspondendo a um tempo de retenção hidráulica (TRH) médio de 20 horas, após a etapa de adaptação do lodo ao efluente, que durou dois dias, foi iniciada a alimentação contínua do reator, com efluente bruto contendo 1243 mg O&G/L, em média.

Neste reator foi observada a formação de espuma, que foi retirada, de forma manual, mensalmente. Todo material flutuante era retirado por meio de uma espátula ou uma “escumadeira”. Este material ficava retido dentro do reator, por isso era necessário abrir o reator para retirá-lo.

A espuma foi analisada de acordo com os seguintes parâmetros: demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos totais fixos e voláteis, óleos e graxas (O&G), carboidratos e proteínas.



Figura 3.1: Reator UASB de bancada usado neste projeto, com espuma formada na superfície.

### 3.2. PRODUÇÃO DO POOL ENZIMÁTICO

O *pool* enzimático foi produzido através de fermentação em meio sólido (FMS) de resíduo agroindustrial da produção de óleo de babaçu (denominado torta de babaçu) pelo micro-organismo *Penicillium brevicompactum*, segundo metodologia descrita por Gutarra et al. (2005, 2007).

A torta de babaçu (meio basal) foi moída e peneirada de forma a se obter tamanhos de partículas com dimensões entre 0,21 e 0,42 mm, sendo armazenada a 4° C até o momento de sua utilização.

A fermentação foi conduzida em becheres de polipropileno de 600 mL, contendo 15 gramas de torta, sem suplementação (C:N 12,3:1), e água suficiente para atingir 65% de umidade inicial. Os béqueres eram então autoclavados a 1atm por 15 minutos e após resfriamento, inoculados com suspensão de esporos previamente preparada até a concentração

desejada de  $1,0 \times 10^7$  esporos/g. As fermentações foram conduzidas a 30°C, durante 48 horas, em estufas com injeção de ar úmido com 95% de saturação.

Ao final da fermentação, uma alíquota da torta era coletada para determinação das atividades enzimáticas, sendo adicionado 5mL de tampão fosfato de sódio (100mM, pH 7,0) por grama. A extração enzimática era realizada em um agitador rotatório a 35°C e 200 rpm por 20 minutos. Posteriormente, o rejeito fermentado era prensado manualmente para a obtenção do extrato enzimático bruto, o qual foi centrifugado a 2000 g por 5 minutos para remoção de sólidos mais finos. O sobrenadante foi utilizado para quantificação, em triplicata, das atividades lipásica e proteásica. O restante da torta fermentada foi embalado à vácuo e armazenado em freezer (-20°C) até o momento de sua utilização.

### **3.3. TRATAMENTO DA ESCUMA (PRÉ-HIDRÓLISE ENZIMÁTICA)**

A hidrólise enzimática foi conduzida em becheres de 600 mL contendo 300 mL de volume total constituído da espuma diluída (6 vezes com água destilada) e *pool* enzimático (0,5% m/v, com atividade lipásica de 11 U/g), com agitação (150 rpm) e temperatura (30° C) controladas, durante 4 horas.

Após este período, a mistura foi filtrada e encaminhada aos ensaios de biodegradabilidade anaeróbia.

A diluição da espuma foi calculada para se obter uma concentração de O&G em torno de 1750 mg/L, compatível com a atividade lipásica do preparado enzimático sólido adicionado. A proporção de concentração de O&G e preparado enzimático se baseou nos resultados obtidos por Damasceno et al. (2012).

### **3.4. TESTE DE BIODEGRADABILIDADE ANAERÓBIA**

Ensaio de biodegradabilidade anaeróbia foram realizados em triplicata com a espuma diluída, com DQO média de 7064 mg/L e 1750 mg O&G/L (Controle) e com a espuma diluída submetida à hidrólise enzimática, com DQO média 7783 mg/L.

A espuma diluída (Controle) e a mistura de espuma diluída e *pool* enzimático após hidrólise, eram colocadas em contato com o lodo anaeróbio, mantendo-se uma relação DQO:

SSV de 1:1, em frascos tipo penicilina de 100 mL, utilizando 90% do volume total. Os frascos eram lacrados com batoque de borracha e selo de alumínio e dispostos em estufa com temperatura controlada a 30°C (Figura 3.2). O lodo empregado nos ensaios de biodegradabilidade anaeróbia era proveniente de reator UASB em operação em indústria de abate de aves, sendo caracterizado em termos de SSV (18.253 mg/L).

Aos frascos eram conectadas seringas plásticas graduadas de 60 mL, para coleta e medição diária do biogás. Ao cessar a produção de biogás, os frascos eram abertos e o sobrenadante separado para análise da DQO solúvel residual e da composição do biogás por cromatografia gasosa.

Alíquotas da mistura eram retiradas antes do contato com o lodo anaeróbio para quantificação da DQO total e após o período de reação (encerramento da produção de biogás) para análise da DQO solúvel residual.



Figura 3.2: Condução do Teste de Biodegradabilidade Anaeróbia.

### **3.5. MÉTODOS ANALÍTICOS – PREPARO DAS AMOSTRAS E ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS**

Amostras de espuma *in natura* foram homogeneizadas através de agitação magnética e submetidas às análises de sólidos, O&G, DBO, DQO, ST e STV, de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). As amostras de espuma foram ainda analisadas de acordo com o método de Lowry e o método de Dubois para determinação de proteínas e carboidratos, respectivamente.

#### **3.5.1. pH**

O pH da espuma e das misturas de espuma e *pool* enzimático foi medido por leitura direta em potenciômetro.

#### **3.5.2. Demanda Química de Oxigênio**

Na determinação da DQO foi empregado o método colorimétrico padrão de refluxo fechado (APHA, 2005), com  $K_2Cr_2O_7$  em meio ácido, contendo  $Ag_2SO_4$  como catalisador e  $HgSO_4$  para eliminar a interferência de cloretos presentes na amostra. As amostras são diluídas (quando necessário) de forma adequada para as faixas de DQO contempladas pelo método. Logo em seguida são adicionadas as soluções para o ensaio, sendo os tubos colocados no digestor Hach a 150°C durante 2 horas. Após resfriamento à temperatura ambiente, é realizada a leitura direta da absorbância em espectrofotômetro. Os brancos são preparados com água destilada substituindo as amostras. Os valores de absorbância a 600 nm são convertidos em DQO através de uma curva padrão previamente preparada utilizando-se biftalato de potássio como substância padrão.

#### **3.5.3. Sólidos Suspensos, Totais, Fixos e Voláteis**

A determinação dos sólidos suspensos totais, fixos e voláteis era realizada com amostras filtradas em filtros de fibra de vidro, com porosidade de 1,2  $\mu m$ , sob vácuo, e o resíduo retido nos mesmos colocados em cápsulas de porcelana previamente taradas (P1). Os conjuntos

(cápsulas e filtros contendo amostra) eram aquecidos em estufa a 105° C até peso constante (P2). Após esta etapa, eram levados à mufla a 550°C por 30 minutos, resfriados e pesados (P3). As concentrações de sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos fixos (SSF) e sólidos suspensos voláteis (SSV) foram calculadas pelas equações a seguir (APHA, 2005).

$$SST = \frac{(P_2 - P_1) \cdot 10^6}{V_a}$$

$$SSF = \frac{(P_3 - P_1) \cdot 10^6}{V_a}$$

$$SSV = \frac{(P_2 - P_3) \cdot 10^6}{V_a}$$

Sendo:

SST = sólidos suspensos totais (mg/L)

SSF = sólidos suspensos fixos (mg/L)

SSV = sólidos suspensos voláteis (mg/L)

P<sub>1</sub> = peso da cápsula vazia (g)

P<sub>2</sub> = peso do conjunto (cápsula + filtro com resíduo) após estufa (g)

P<sub>3</sub> = peso do conjunto (cápsula + filtro com resíduo) após mufla (g)

V<sub>a</sub> = volume de amostra (mL)

Procedimento similar era adotado para a quantificação de sólidos dissolvidos totais (fixos e voláteis), sendo substituído o filtro contendo a amostra, pelo volume permeado (amostra que não ficava retida nos filtros de fibra de vidro com porosidade de 1,2 µm).

#### 3.5.4. Óleos & Graxas

A determinação do teor de O&G na espuma foi realizada através de extração em Soxhlet, utilizando hexano como solvente, de acordo com procedimento padrão (APHA, 2005). As amostras dos efluentes são acidificadas com 5 ml/L de HCl diluído (1:1 v/v) e filtradas em disco de papel de filtro Whatman número 4, coberto com uma camada de diatomita, obtida pela filtração de uma suspensão aquosa (5% m/v) de terra diatomácea. As amostras preparadas foram colocadas dentro de um cartucho de extração previamente



descontaminado pela extração com hexano por 2 horas. Os cartuchos com as amostras são colocados para secar em estufa a 105°C por 30 minutos. A análise é realizada utilizando-se balões limpos com pérolas de vidro, previamente tarados após secagem a 105°C e resfriamento em dessecador, obtendo-se P1. Em cada balão são colocados 200 mL de hexano, sendo estes conectados ao extrator Soxhlet contendo o cartucho com a amostra. A extração com hexano é realizada a uma velocidade de 20 ciclos por hora durante 4 horas. Após esse período, o hexano é evaporado em rotoevaporador e o balão contendo os resíduos oleosos colocado para secar em estufa a 105°C até peso constante e, após resfriamento, pesado obtendo-se P2. A concentração de O&G na escuma é calculada pela equação a seguir.

$$O \& G = \frac{(P_2 - P_1) \cdot 10^6}{V_a}$$

onde:

O&G = teor de óleos e graxas (mg/L)

P1 = peso do balão + pérolas de vidro (g)

P2 = peso do balão + pérolas de vidro + resíduo gorduroso (g)

Va = volume da amostra filtrada (mL)

### 3.5.5. Volume e Composição do Biogás

Nos ensaios de biodegradabilidade anaeróbia, seringas plásticas graduadas de 60 mL conectadas aos frascos tipo penicilina permitiram quantificar o volume de biogás produzido por deslocamento do êmbolo das mesmas. A composição do biogás foi analisada por cromatografia gasosa em cromatógrafo VARIAN MICRO GC 4900. O biogás produzido era recolhido em ampolas gasométricas e injetado diretamente no cromatógrafo. As condições utilizadas na cromatografia foram: Coluna- PPQ- 10 m x 0,32 mm; Temperatura da coluna - 50°C; Detector - condutividade térmica (TCD); Temperatura do detector - 250°C; Temperatura do injetor - 80°C; Gás de arraste - Hélio; Tempo de análise -1,5 minutos.

### 3.5.6. Proteínas

O método de Lowry et al. (1951) se baseia na reação do cobre com a proteína, em meio alcalino, e posteriormente redução do reagente de fosfomolibdato-fosfotungstenato no reagente folin. Quando o reagente folin é adicionado à proteína tratada com o cobre, ocorre a

redução do reagente folin que resulta em uma cor mais intensa, com absorção máxima em 550 nm. A concentração de proteínas é determinada através de uma curva padrão previamente construída para a soroalbumina bovina e a análise é realizada em triplicata.

O método de Lowry, ou método do folin-fenol, é o método mais utilizado pelos pesquisadores, devido à sua simplicidade, precisão e sensibilidade.

Em tubos de ensaio, são adicionados 0,4 mL de amostra e 2,0 mL da solução A, que consiste em uma mistura de 1,0 mL de tartarato duplo de sódio e potássio a 2,68% m/v, 1,0 mL da solução de  $\text{CuSO}_4$  a 1,0% m/v e 98 mL da solução de carbonato de cálcio 2% m/v em hidróxido do sódio 0,1N. Após essa adição, aguarda-se 10 minutos e acrescenta-se 0,2 mL da solução Folin 1:2, homogênea-se e aguarda-se mais 30 minutos. Após esse procedimento é feita a leitura de absorbância a 550 nm.

### **3.5.7. Carboidratos**

O método utilizado para a determinação de carboidratos foi o do fenol e ácido sulfúrico, baseado na metodologia descrita por Dubois et al. (1956), que consistiu na adição de fenol e ácido sulfúrico concentrado à amostra, os quais em presença de carboidratos, resultam em cor laranja quantificada a 490 nm. Preparar cinco soluções-padrão de glicose (D-glicose). Pesar em balança analítica 20, 40, 60, 80 e 100 mg de glicose e transferir, quantitativamente, para balões volumétricos de 1L. Completar o volume com água destilada.

Para o preparo da solução de fenol a 5%, adicionar 50 mL de água destilada a um becher de 100 mL. Pesar 5 gramas de fenol (p.a.) e transferir para o becher. Agitar a solução e transferir quantitativamente para um balão volumétrico de 1L. Completar o volume com água destilada.

Pipetar em tubos de ensaio (dois tubos para cada amostra) 1mL de cada solução padrão, 1mL da amostra e 1mL de água destilada (para o teste “branco”). Adicionar 1mL de fenol a 5% e agitar os tubos vigorosamente. Após agitação, adicionar rapidamente 5,0mL de ácido sulfúrico concentrado (95,5%) pelas paredes dos frascos e agitar o conteúdo novamente. Os frascos devem permanecer em repouso por 10 minutos ao abrigo da luz. Agitar em vortex e levar a banho-maria a 25-30°C durante 15 minutos. Após esse procedimento a leitura da absorbância é feita a 490 nm.

### 3.5.8. Atividade Lipásica

A atividade lipásica foi determinada utilizando-se uma emulsão composta por 5% (m/v) de óleo de oliva emulsionado por 3 minutos com 5% (m/v) de goma arábica em tampão fosfato de sódio (0,1 mol/L, pH 7,0). Em 19 mL desta emulsão adicionava-se 1mL do preparado enzimático, sendo este material incubado a 35°C por 20 minutos a 200 rpm. A reação era interrompida pela adição de uma solução de acetona:etanol (1:1 v/v), para extração dos ácidos graxos liberados. Os ácidos graxos foram titulados em titulador automático até pH 11,0, com solução de NaOH 0,04 mol/L. Os brancos reacionais foram obtidos adicionando-se o preparado enzimático antes da titulação. Uma unidade de atividade lipásica foi definida como a quantidade de enzima que libera 1 μmol de ácido graxo por minuto, nas condições do ensaio (Freire *et al.*, 1997, *apud* Gutarra, 2007), sendo determinada pela equação abaixo:

$$A = \frac{(V - V_b).m.1000}{t.V_e}$$

Onde:

A = atividade lipásica (U/mL)

V = volume de solução de NaOH gasto na titulação da amostra

V<sub>b</sub> = volume de solução de NaOH gasto na titulação do branco (mL)

m = concentração da solução de NaOH (milimoles/mL)

t = tempo de reação (minutos)

V<sub>e</sub> = volume de extrato enzimático (mL)

A atividade lipásica por grama (U/g) foi calculada pela multiplicação da atividade enzimática no extrato líquido (U/mL) pelo volume de tampão utilizado na extração e divisão pelo peso seco da torta fermentada.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. ANÁLISE VISUAL DA ESCUMA E DO PROCEDIMENTO DE RETIRADA

As características apresentadas pelo efluente bruto que alimentava o reator (Tabela 3.1), tais como o alto teor de material insolúvel (SST) e gorduroso (O&G), favoreceram a formação de espuma.

A espuma formada na parte externa do separador trifásico do reator UASB era uma camada de material flutuante, não muito espessa, bastante escura, acumulada na superfície líquida. A espuma do interior do separador trifásico se mostrou muito líquida, não se conseguindo coletar grande quantidade de material sólido.

Com relação ao procedimento de retirada de espuma, a utilização de espátula e “escumadeira” se mostrou satisfatória para a periodicidade de coleta estabelecida de 30 dias. No entanto, com respeito à retirada da espuma do interior dos separadores trifásicos dos reatores, ainda não se atingiu um procedimento ideal, na medida em que não ocorreu muito acúmulo nessa região durante o período de operação do reator.

### 4.2. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DA ESCUMA

A espuma coletada na superfície do reator e no separador trifásico, depois de retiradas, foram homogeneizadas para fins de caracterização. Os valores obtidos encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Características da espuma removida do reator UASB.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor (mg/L)</b>
DQO <sub>T</sub>	42383
DQO <sub>S</sub>	1040
DBO	21000
O&G	10500
Proteínas	7850
Carboidratos (eq. Glicose)	1250
SST	76935
SSV	68075

A concentração de matéria orgânica na espuma, conforme indicado pelos valores de DBO e DQO e pela elevada relação SSV/SST (88,5%), é muito elevada. Assim como a biodegradabilidade do material constituinte da espuma, pois a relação DQO/DBO<sub>5</sub> é aproximadamente 2.

A composição da espuma em termos de O&G, carboidratos e proteínas revelou maiores percentuais de gordura (15,4% em relação aos SSV), seguida de proteína (11,5%) e carboidratos (1,8%).

Através dessas análises chegou-se à conclusão de que a espuma pode ser qualificada como um material extremamente concentrado em sólidos, sendo esses sólidos, em boa parte, de natureza orgânica. Apresenta gorduras, proteínas e carboidratos na sua composição, sendo predominante a fração de lipídeos, pois cerca de 25% da DQO da espuma é proveniente de material lipídico.

Apesar da DQO encontrada no presente estudo ter sido um pouco menor, a composição obtida para a espuma foi muito similar à do reator R2 do estudo conduzido por Souza (2006), que avaliou a espuma de reatores UASB tratando esgoto doméstico e obteve 30% de seu material orgânico proveniente de lipídeos, 16% de proteínas e 15% de carboidratos. Tanto no estudo de Souza (2006) quanto no estudo aqui apresentado, a maior parte da espuma é composta por lipídeos, mas também é possível observar uma grande quantidade de proteína. Houve uma discordância em relação aos valores de carboidratos encontrados na análise, porém, como já foi dito anteriormente, a espuma varia muito de acordo com o tipo de efluente tratado.

### **4.3. TRATAMENTO ENZIMÁTICO**

Baseado nos resultados de composição da espuma, selecionou-se para o tratamento enzimático o preparado enzimático sólido (PES) produzido pelo fungo *Penicilium brevicompactum*, que apresentou uma atividade lipásica satisfatória, de aproximadamente 11 U/g. Na Tabela 4.2 são apresentados os valores de DQO total e solúvel da espuma antes e após a hidrólise enzimática.

Tabela 4.2. DQO da espuma antes e após o tratamento enzimático.

	<b>T<sub>0</sub></b>	<b>T<sub>4</sub></b>	$\Delta = T_4 - T_0$ <b>(mg/L)</b>
DQO <sub>T</sub> (mg/L)	42383	46700	4317
DQO <sub>S</sub> (mg/L)	1040	12025	10985

O aumento da DQO solúvel após o tratamento enzimático foi considerável, 11.6 vezes. Isso era esperado, pois a hidrólise enzimática tem como objetivo hidrolisar lipídeos a ácidos graxos e glicerol pela ação das lipases, aumentando a concentração de material orgânico solúvel. Como este material solúvel se torna disponível, a ação dos micro-organismos anaeróbios é facilitada, podendo então, aumentar a produção de biogás. A DQO<sub>T</sub> da espuma tratada também aumentou, cerca de 10%. Este aumento pode ser devido a um erro experimental, pois é próximo ao erro do método ou à presença de partículas de torta fermentada (PES).

#### 4.4. TESTE DE BIODEGRADABILIDADE ANAERÓBIA

Após o tratamento enzimático, tanto a espuma tratada (hidrolisada) quanto a espuma sem tratamento foram diluídas e apresentaram a DQO<sub>T</sub> inicial apresentada na Tabela 4.3 abaixo. Os resultados do teste de biodegradabilidade anaeróbia das espumas citadas são apresentados na Tabela 4.3 e Figura 4.1.

Tabela 4.3. Comparação dos dados do Teste de Biodegradabilidade com espuma sem e com pré-hidrólise enzimática

<b>Parâmetros</b>	<b>Controle</b>	<b>Hidrolisado</b>
DQO <sub>T</sub> (mg/L) – Inicial	7064	7783
DQO <sub>S</sub> (mg/L) – Final	427	685
Remoção de DQO (%)	94	92
Volume de biogás produzido (mL, 30°C)	108	206
% de Metano	85	79
PEM (mL CH <sub>4</sub> /g DQO removida)	0,154	0,251

PEM = produção específica de metano a 30°C.

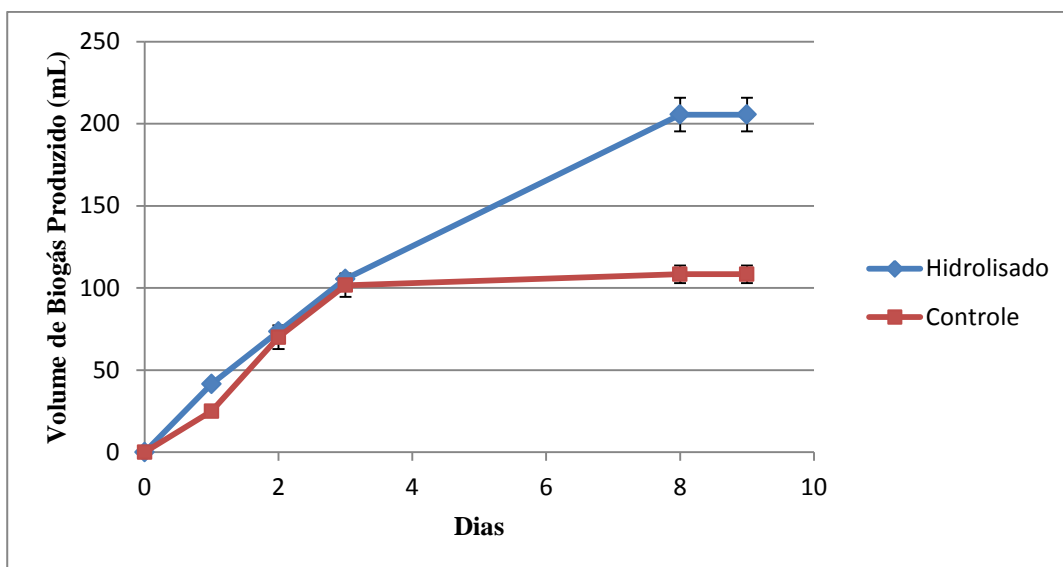


Figura 4.1: Volume de biogás produzido para cada condição ao longo do teste.

Na Figura 4.1 percebe-se um perfil ligeiramente diferente para as duas condições. Enquanto a espuma bruta apresenta uma curva em “S”, indicando uma adaptação dos microorganismos aos constituintes do meio e uma fase lag, embora reduzida, a curva da espuma hidrolisada tem a forma de uma hipérbole, indicando uma total adaptação dos microorganismos aos constituintes do meio. Nesta Figura também fica clara a estabilização da produção de biogás em tempos muito menores (cerca de 3 dias) para espuma bruta, enquanto a espuma hidrolisada mantém a produção de biogás até cerca de 8 dias. Considerando que ambas as espumas apresentavam DQO total inicial similar, fica claro por esta diferença o feito da etapa de pré-hidrólise enzimática na disponibilização da matéria orgânica para os microorganismos.

Durante o teste observou-se que a quantidade de biogás produzida pela espuma com pré-tratamento enzimático foi quase o dobro da espuma Controle (108 mL no Controle e 206 mL no Hidrolisado). Porém, a remoção de DQO do Controle foi pouco maior do que o do Hidrolisado, 94% contra 92%, assim como a porcentagem de metano no biogás também foi maior.

Comparando os valores de PEM na Tabela 4.3, mesmo apresentando maior remoção de DQO e maior porcentagem de metano no biogás produzido, a condição Controle apresentou menor PEM. A hidrólise enzimática da espuma levou a uma PEM 63% mais elevada do que no Controle, sem o tratamento enzimático.

Valladão (2009) observou o efeito de dois fenômenos concorrentes durante a degradação da matéria orgânica no pré-tratamento enzimático de efluente com alto teor de

gordura com influência direta na PEM: o efeito da aclimação da biomassa aos constituintes do efluente e do preparado enzimático sólido (PES) e o efeito do acúmulo de gordura na biomassa.

Nos estudos feitos por Damasceno et al. (2012), o acúmulo de gordura resultou em um decréscimo acentuado da PEM nos experimentos com efluente bruto. Já nos ensaios com efluente pré-tratado, a PEM variou de 0,105 a 0,207 L CH<sub>4</sub>/g DQO<sub>remov.</sub>, em função de uma adaptação da biomassa aos constituintes do meio e do baixo acúmulo de gordura. O pré-tratamento reduz consideravelmente a matéria orgânica particulada (partículas de gordura em suspensão) no efluente, restando praticamente matéria orgânica solúvel, mais prontamente assimilável pelos micro-organismos.



## **5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

### **5.1. CONCLUSÕES**

A formação de espuma é um problema frequente e de difícil solução em reatores UASB. Embora existam alguns modos de operação e dispositivos de remoção para amenizar os problemas decorrentes do acúmulo de espuma nos reatores, sua formação ainda não está totalmente esclarecida, assim como os métodos desenvolvidos para remoção não são totalmente eficientes.

A espuma coletada no reator UASB de bancada se mostrou um resíduo bastante concentrado em sólidos e matéria orgânica altamente biodegradável.

Proteínas, carboidratos e lipídeos foram identificados na composição da espuma, sendo os lipídeos preponderantes; no entanto, outros constituintes desconhecidos existem no material e, em conjunto, contribuem para a DQO total.

A PEM no teste de biodegradabilidade anaeróbia com espuma após pré-tratamento enzimático foi 63% maior do que na espuma bruta, podendo-se concluir que o tratamento enzimático/biológico para aproveitamento da matéria orgânica da espuma pode ser eficaz, aumentando a produção de metano no reator anaeróbio e evitando o descarte da espuma como um resíduo.

### **5.2. SUGESTÕES**

- Realizar testes de hidrólise enzimática e biodegradabilidade com espuma e esgoto de reatores anaeróbios de plantas de tratamento de esgoto doméstico;

- Realizar uma análise econômica para se verificar a viabilidade do uso do tratamento enzimático;

- Avaliar outros tempos de hidrólise enzimática.

## 6. REFERÊNCIAS

APHA (American Public Health Association), American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18. ed. New York, 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.

CAMMAROTA, M. C.; FREIRE, D. M. G. A review on hydrolytic enzymes in the treatment of wastewaters with high oil and grease content. *Bioresource Technology*, vol. 97, nº 17, p. 2195-2210, 2006.

CASTILHO, L.R.; POLATO, C.M.S.; BARUQUE, E.A.; SANT'ANNA JR, G. L.; FREIRE, D. M. G. Economic analysis of lipase production by *Penicillium restrictum* in solid-state and submerged fermentations. *Biochemical Engineering Journal*, vol. 4, p. 239-247, 2000.

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores Anaeróbios- Edição Revisada e Ampliada. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, 2007.379 p.

CHERNICHARO, C.A., ALMEIDA, P. G., LOBATO, C., COUTO, T. C., BORGES, J. M., LACERDA Y. S. Experience with the design and *start up* of two full-scale UASB plants in Brazil: Enhancements and drawbacks. *Wat. Sci. Technol.* **60**(2), 507-515, 2009.

DAMASCENO, F. R. C.; CAMMAROTA, M. C.; FREIRE, D. M. G. The combined use of a biosurfactant and enzyme preparation to treat effluent with a high fat content. *ColloidsandSurfaces B: Biointerfaces*, vol. 95, p. 241-246, 2012.

DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, v.28, 350-356, march, 1956.

FANG, H. H. P. (2010) *Environmental Anaerobic Technology: Applications and New Developments*, Imperial College Press, London.

FORESTI, E., ZAIAT, M., VALLERO, M. Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges, *Reviews in: Environ. Sci. and Bio/Technol.*, v.5: p. 3-19, 2006.

GERARDI, M. H. *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 177p.

GRADY JR, C. P. L. et al. *Biological Wastewater Treatment*. CRC Press, Boca Raton, EUA, 2011.

GUTARRA, M. L. E.; CAVALCANTI, E.D.C.; FREIRE, D.M.G.; CASTILHO, L.R.; SANT'ANNA JR, G.L. Lipase production solid state fermentation: Cultivation conditions and operation of a packed – bed bioreactors. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 121, p. 105-116, 2005.

GUTARRA, M. L. E.; GODOY, M. G.; CASTILHO, L. R.; FREIRE, D. M. G. Inoculum strategies for *Penicillium simplicissimum* lipase production by solid state fermentation using a residue of the babassu oil industry. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 82, n° 3, p. 313 - 318, 2007.

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 potential. *Water Research*, v. 39, p. 2475 – 2482, 2005.

HASAN, F.; SHAH, A. A.; HAMEED, A. Industrial applications of microbial lipases. *Enzyme and Microbial Technology*, vol. 39, n° 2, p. 235-251, 2006.

HUG, THOMAS. Characterization and controlling of foam and scum in activated sludge systems. ETH (2006).

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*, vol. 32, nº 5, p.1571-1579, 1998.

KLEEREBEZEM, R. AND MACARIE, H. (2003) Treating industrial wastewater: anaerobic digestion comes of age. *Chem. Eng.* April, p. 56-64.

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. *WaterSA*, v. 27, n. 4, p. 433 – 444, 2001.

LETTINGA, G., HULSHOFF POL, L.W. UASB - Process design for various types of wastewaters. *Water Science Technology*, v. 24, n. 8, p. 87-107, 1991.

LOWRY, O H., ROSEBROUGH, N.J., FARR, A L., RANDALL, R. (1951) Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J.Biol. Chem*, 193, 265-275.

METCALF; EDDY *Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*.3 ed. Metcalf & Eddy, Inc., 1991. 1334p.

MOEN, G. Anaerobic digester foaming: causes and solutions. *Water Environ Technol*, v. 15, n. 8, p. 70 – 73, 2003.

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 LATINOAMERICANO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA, Mérida, Yucatán - México. IWA/FEMISCA, 2002, p. 553 – 560.

PEÑA, M. R., MARA, D. D., AVELLA, G. P. Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates. *Water Research*, v.40, p. 445 452, 2006.

RAMAN, P.; RANGA RAO, V. V.; KISHORE, V. V. N. A static scum-breaking net for fixed-domebiogás 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 biogas plants. *Biological Wastes*, v. 30, p. 261 – 273, 1989.

SANT'ANNA JUNIOR, G. L. Tratamento Biológico de Efluentes: fundamentos e aplicações. Rio de Janeiro, RJ, Ed. Interciência, 2010. 418p.

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 BIODOSSÍLIDOS DO MERCOSUL, I SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE BIODOSSÍLIDOS, 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.

SAXENA, R.K; DAVIDSON, W.S.; SHEORAN, A.; BHOOPANDER, G. Purification and characterization of an alkaline thermostable lipase from *Aspergillus carneus*. *Process Biochemistry*, vol. 39, nº 2, p. 239-247, 2003.

SCHELLINKHOUT, A., COLLAZOS, C.J. Full-scale application of the UASB technology for sewage treatment. *Water Science Technology*, v.25, n. 7, p. 159–166, 1992.

SOUZA, C.L. Estudo quantitativo e qualitativo de espuma acumulada em reatores UASB tratando esgotos domésticos. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2006, 100p.

SOUZA, C.L., SILVA, S.Q., AQUINO S.F., CHERNICHARO C.A.L. Production and characterization of scum and its role in odour control in UASB reactors treating domestic wastewater, *Water Science Technology*, v. 54, n. 9, p. 201-208, 2006.

TREICHEL, H.; OLIVEIRA, D.; MAZUTTI, M. A.; LUCCIO, M.; OLIVEIRA, J. V. A Review on Microbial Lipases Production. *Food and Bioprocess Technology*, vol. 3, nº 2, p. 182-196, 2010.

VALLADÃO, A. B. G. Efeito de Pré-Hidrólise Enzimática de Gordura na Biodegradação Anaeróbia de Efluente de Indústria de Abate de Ave. Tese de Doutorado, IQ/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

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.; KATO, M. T.; CAVALCANTI, P. F. F.; FLORENCIO, L. Anaerobic reactor design concepts for the treatment of domestic wastewater. *Reviews in Environmental Sciences and Biotechnology*, vol. 5, nº 1, p. 21-38, 2006.

VAN HAANDEL et al. *Advanced Biological Treatment Processes for Industrial Wastewaters*. London: International Water Association, v.1, 2006. Closing process water cycles and product recovery in textile industry: perspective for biological treatment, p.162-180.