

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,

MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

**AVALIAÇÃO DE PROTOCOLOS DE DESCARTE
E DESIDRATAÇÃO DA ESCUMA ACUMULADA
NO INTERIOR DE SEPARADORES TRIFÁSICOS
DE REATORES UASB**

Carlos Andrés Díaz Flórez

Belo Horizonte

2016

**AVALIAÇÃO DE PROTOCOLOS DE DESCARTE E
DESIDRATAÇÃO DA ESCUMA ACUMULADA NO
INTERIOR DE SEPARADORES TRIFÁSICOS DE
REATORES UASB**

Carlos Andrés Díaz Flórez

Carlos Andrés Díaz Flórez

**AVALIAÇÃO DE PROTOCOLOS DE DESCARTE E
DESIDRATAÇÃO DA ESCUMA ACUMULADA NO
INTERIOR DE SEPARADORES TRIFÁSICOS DE
REATORES UASB**

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: Tratamento de Águas Residuárias

Orientador: Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2016

D542a

Díaz Flórez, Carlos Andrés.

Avaliação de protocolos de descarte e desidratação da espuma acumulada no interior de separadores trifásicos de reatores UASB [manuscrito] / Carlos Andrés Díaz Flórez – 2016.
x, 83 f., enc.: il.

Orientador: Calos Augusto de Lemos Chernicharo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 80-83.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Saneamento - Teses. 3. Esgotos - Teses. I. Chernicharo, Calos Augusto de Lemos. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)

AGRADECIMENTOS

A minha mãe que com amor sempre nos incentivou pelo estudo e que deixou a semente para a realização deste sonho.

A meus queridos pai e irmãos e toda a família que desde Colômbia sempre estão torcendo para que tudo de certo no meu projeto aqui no Brasil. Especial agradecimento a minha tia Nelly por seus motivadores mensagens de animo e afeto.

Ao professor Carlos pela oportunidade de trabalhar com ele, foi uma honra ser seu orientado. Muito obrigada pela confiança, ensinamentos recebidos, atenção, paciência com minhas limitações e dedicação ao longo deste processo.

Especial agradecimento para Laís Alves, Marina Jorge e Poliana Gomes que participaram como estudantes de iniciação científica na minha pesquisa. Sempre prestativas e comprometidas com o trabalho. A ajuda delas foi fundamental.

A Thiago Bressani pela boa parceria na equipe de trabalho do CePTS e especialmente pela amizade e valiosa colaboração ao longo da etapa experimental, intercambio de ideias e revisões dos documentos.

A meus colegas do programa, os quais fizeram este passo no mestrado mais enriquecedor do que esperava. Sempre levarei comigo os felizes momentos compartilhados com Debora, Laura, Mariana, Taiana, Bárbara, Carolina, Deborah, Fernanda, Natália, Fabricia, Elias, Neuciano, Rafael, Jorge, Allyson, Luis, Ricardo, Daniel, Renato, Higor e Wellington Aood cuja temprana partida deixou um grande vazio em todos nós. Além de todos os outros amigos brasileiros e estrangeiros, e meus conterrâneos colombianos que foram um grande apoio e companhia.

A todos os amigos que conheci na sala de políticas públicas, onde me senti acolhido, tive um espaço para trabalhar e compartilhar excelentes momentos.

A Seu Raimundo pelo auxílio e boas ideias no CePTS com a montagem do experimento, e que junto a Yuyu tivemos um excelente convívio nos meus trabalhos de campo.

A todos os professores com quem tive a fortuna de ter aulas: Antonio Matos, Eduardo von Sperling, Juliana Calabria, Léo Heller, Marcos von Sperling, Silvia Correa.

A Lariza Azevedo pela ajuda com revisões de meus documentos e treinamento com as apresentações e a Natália Cruz pela ajuda com a montagem dos testes de AMPTS.

Ao professor Cláudio Leite e Aracele Viera, que deixaram importantes antecedentes no assunto da minha pesquisa, além que me darem importantes aportes e esclarecimentos no decorrer da minha pesquisa.

A Cinthia e Mirna, funcionarias dos laboratórios de microbiologia e de análises físico-químicas, pela gentileza e valiosa ajuda.

A Susane pela importante ajuda com a logística e insumos da pesquisa e coordenação do veículo para o CePTS. Também a Vanessa que nos transportava.

Ao prof. Cláudio Montenegro e Roberto nos laboratórios de Caracterização e Minérios e Materiais DEMIN/UFMG pela disponibilização do moinho.

A Alexandre no Laboratório de Físico-químicos do Departamento de Engenharia Química pela disponibilização do equipamento para os testes de O&G.

A Julio na secretaria do PPG-SMARH pela amabilidade e ajuda com todas as solicitações realizadas.

À UFMG, ao programa PPG-SMARH e CNPq, por abrir-me as portas e por todos os benefícios recebidos ao longo do minha vida de estudante. Levarei com grande orgulho o título deste programa e desta universidade.

Obrigado meu Deus pela tua proteção e bençãos recebidas, por me ajudar a finalizar com sucesso este mestrado, por me dar a oportunidade de viver esta enriquecedora experiência de vida, neste maravilhoso e amado país.

RESUMO

O controle da espuma acumulada no interior de separadores trifásicos (STf) de reatores UASB é considerado um dos principais problemas operacionais em Estações de Tratamento de Esgoto - ETEs. Neste sentido, esta pesquisa teve como objetivo principal avaliar rotinas de descarte de espuma do interior do STf. Além disso, foram avaliadas etapas de peneiramento, adensamento e desidratação de espuma, visando estabelecer alternativas de gerenciamento. O aparato experimental, encontra-se localizado no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento UFMG/COPASA (CePTS), em Belo Horizonte – MG. Este consistiu de um reator UASB em escala de demonstração (volume útil: 16,8 m³), equipado com dispositivo de remoção hidrostática de espuma, unidade de peneiramento, unidade de adensamento e leitos de secagem. Os descartes foram realizados aplicando o mecanismo de remoção hidrostática com variação das condições operacionais de frequência de descarte, grau de abertura de válvula, tempo de descarte e nível da interface espuma/biogás em relação à borda da canaleta de descarte. A desidratação foi monitorada através da redução na concentração de Sólidos Totais (ST), assim como dos volumes remanescentes no leito de secagem e das frações evaporada e percolada. No processo de adensamento foram avaliados os teores de Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Óleos e Graxas (O&G) da fração clarificada. Adicionalmente foi avaliada a biodegradabilidade anaeróbia da fração sobrenadante. As eficiências medianas de remoção de espuma variaram de 75,6% a 90,1%, com volumes de descarte de 110,9 a 142,2 L, para frequências de descarte de 2 e 5 dias. As melhores condições operacionais foram obtidas para a rotina de descarte com frequência de 5 dias e nível da interface espuma/biogás de 2 a 5 cm abaixo da borda da canaleta. Encontrou-se grande capacidade dos leitos para a desidratação da espuma, com redução de ST, passando de uma concentração mediana de 0,3% (dia de descarte) para uma concentração de 89,0% após um período de cinco dias de desidratação. No processo de adensamento, a fração clarificada apresentou concentrações medianas de ST, STV, DQO, DBO, DQO/DBO e O&G nas faixas usuais de esgoto bruto o que viabilizaria sua recirculação para o reator UASB. A fração sobrenadante de espuma apresentou baixas taxas de produção de metano (143,4 a 156,2 mL CH₄.gSTV⁻¹).

ABSTRACT

The scum which is accumulated within the three-phase separator (TPS) is considered one of the main operational problems of UASB reactors in domestic waste water treatment systems. In this sense, the main purpose of this research was to evaluate routines of scum discharge from the inner of TPS. Moreover, were evaluated the stages of sieving, thickening and drying scum looking for the establishment of alternatives of management. The experimental apparatus is located in the Research and Training Center in Sanitation- UFMG / COPASA (CePTS) in Belo Horizonte - MG. This consisted of a UASB reactor in demonstration scale (useful volume: 16,8 m³), equipped with hydrostatic scum removal device, sieving unit, thickening unit and drying beds. The discharges were executed applying the hydrostatic removal mechanism with variation of operational conditions of discharge frequency, valve opening degree, discharge duration and level of interface scum/biogas in relation with edge of the weir of discharge. The drying was monitored through the total solids (TS) reduction, as well as through beds volume and the evaporated and percolated fractions. In the thickening process were evaluated the contents of total solids (TS), volatile total solids (VTS), chemical oxygen demand (COD) and oil and grease (O&G) from the clarified fraction. Additionally was evaluated the anaerobic biodegradability of the supernatant fraction. The median efficiencies for the scum removal ranged for 75,6% to 90,1%, with volumes of discharge ranged for 110,9 to 142,2 L, to discharge frequencies of 2 to 5 days. The best operational conditions were obtained for routine with frequency of discharge of 5 days and level of scum interphase biogas/scum from 2 to 5 cm below the edge of the weir. Was encountered great capacity of the beds for the drying of the scum, reducing total solids from a median concentration of 0,3% (disposal day) to a concentration of 89,0% after five days of drying. In the densification process were obtained median concentrations of TS, VTS, COD, BOD, COD/BOD and O&G in the usual ranges of de domestic sewage which would allow their recirculation. The supernatant fraction of scum had slow rates of methane production (143,4 a 156,2 mLCH₄.gVTS⁻¹).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	Objetivos	13
2.1	Objetivo geral	13
2.2	Objetivos específicos	13
3	Revisão da literatura	14
3.1	Reatores UASB	14
3.2	Escuma	15
3.2.1	Definição, formação e problemas operacionais da escuma em reatores UASB	15
3.2.2	Características físico-químicas e microbiológicas	17
3.2.3	Biodegradabilidade anaeróbia	18
3.2.4	Acumulação de escuma em reatores UASB	18
3.2.5	Influência do descarte de lodo na taxa de acumulação de escuma	20
3.2.6	Controle de escuma em reatores UASB	21
3.2.7	Gerenciamento da escuma	25
3.3	Desidratação de escuma usando leitos de secagem em ETEs	28
3.3.1	Princípios do processo de desidratação	28
3.3.2	Princípios de operação dos leitos de secagem	28
3.3.3	Aplicação de leitos de secagem para desidratação da escuma	29
3.4	Processo de adensamento de escuma em ETEs	30
3.5	Antecedentes sobre estudo de escuma no DESA-UFMG	30
4	MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1	Área de estudo	32
4.2	Fluxograma da pesquisa e aparato experimental	32
4.3	Etapa 1: Estabelecimento de rotinas de descarte	34
4.3.1	Aparato experimental	34
4.3.2	Sistema de remoção hidrostática de escuma	35
4.3.3	Amostragem e análise de sólidos das frações de escuma	39
4.3.4	Eficiência de remoção de escuma	39
4.3.5	Determinação da taxa de acumulação de escuma	39
4.3.6	Fase 1: Avaliação exploratória do dispositivo de remoção hidrostática e definição de rotinas de descarte	40
4.3.7	Fase 2: Avaliação das rotinas de descarte definidas e comparação estatística para definir a melhor alternativa	41
4.4	Etapa 2: Avaliação do sistema de peneiramento e desidratação de escuma	43
4.4.1	Aparato experimental	43 ^v
4.4.2	Monitoramento dos leitos de secagem	44
4.4.3	Área de leito requerida para o descarte de escuma	46

4.4.4	Balanço de O&G da espuma descartada e desidratada no leito de secagem	47
4.5	Etapa 3: Avaliação do sistema de pré-adensamento de espuma	47
4.5.1	Aparato experimental	47
4.5.2	Biodegradabilidade anaeróbia da fração sobrenadante de espuma adensada	49
4.6	Tratamento estatístico de dados	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1	Etapa 1: Estabelecimento de rotinas de descarte de espuma	51
5.1.1	Fase exploratória de descarte	51
5.1.2	Fase de comparação estatística	53
5.1.3	Biogás perdido durante a operação de descarte de espuma	56
5.1.4	Volumes e concentrações de sólidos das frações de espuma geradas no descarte	57
5.1.5	Carga de DQO afluente ao reator e taxa acumulação de espuma	59
5.1.6	Influência do lodo na acumulação de espuma	59
5.2	Avaliação do sistema de peneiramento e desidratação de espuma	61
5.2.1	Varição do teor de sólidos totais com o tempo de desidratação	61
5.2.2	Varição do volume no leito com o tempo de desidratação	63
5.2.3	Área de leito requerida para a desidratação de espuma do interior do STf	64
5.2.4	Balanço de O&G no processo de descarte e desidratação da espuma	67
5.3	Avaliação do sistema de pré-adensamento da espuma	69
5.3.1	Volumes de cada fração gerada na etapa de adensamento de espuma	69
5.3.2	Caracterização da fração clarificada de espuma no processo de adensamento	69
5.3.3	Potencial de produção de metano a partir da fração sobrenadante de espuma adensada	71
5.3.4	Fluxograma de descarte de espuma com etapa de adensamento e desidratação em leitos de secagem ⁷⁴	
6	CONCLUSÕES	78
7	REFERÊNCIAS	80

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 3.1: Configuração esquemática de reator UASB</i>	14
<i>Figura 3.2: Tópicos de interesse para o melhoramento dos reatores UASB tratando esgoto doméstico</i>	15
<i>Figura 3.3 : Corte esquemático de reatores UASB geminados R1 e R2 e identificação dos tipos de espuma que podem acumular</i>	19
<i>Figura 3.4 : Canaleta do interior do STf para descarte de espuma</i>	22
<i>Figura 3.5 : Representação esquemática de dispositivo para remoção hidrostática de espuma, pela redução da pressão de biogás.</i>	23
<i>Figura 3.6 : Alternativas de gerenciamentos da espuma em ETEs</i>	26
<i>Figura 3.7 : Leito de secagem cheio com espuma: ETE Vassoural, Guarapuava-PR (Esquerda) e ETE Menino Deus, Quatro Barras - PR (Direita)</i>	29
<i>Figura 3.8: Antecedente de estudo sobre espuma no DESA-UFMG.</i>	31
<i>Figura 4.1 : Fluxograma das etapas experimentais da pesquisa</i>	33
<i>Figura 4.2 : Fluxograma general do aparato experimental por etapas desenvolvidas na pesquisa</i>	33
<i>Figura 4.3: Visualização do aparato experimental: a) Caps de observação localizados na parte superior externa do STf; b) Reator UASB e tubulação de descarte de espuma; c) peneira e tanque de descarte</i>	34
<i>Figura 4.4: Identificação dos níveis e pressões hidrostáticas no sistema de remoção de espuma</i>	35
<i>Figura 4.5: Principais dispositivos envolvidos no mecanismo de remoção hidrostática da espuma</i>	36
<i>Figura 4.6: Ilustração da saída de espuma pela canaleta descarte</i>	36
<i>Figura 4.7: Peneira estática para coleta da fração grosseira de espuma descartada</i>	37
<i>Figura 4.8: Coleta da espuma retida no STf por meio de peneira de amostragem de 1 mm.</i>	38
<i>Figura 4.9: Identificação da coleta das três frações de espuma descartada do STf</i>	38
<i>Figura 4.10: Sistema de leitos de secagem em escala piloto: a) Corte esquemático e dimensões; b) Vista dos leitos de secagem instalados sob cobertura de telha de fibrocimento.</i>	44
<i>Figura 4.11: (a) Preenchimento dos leitos de secagem. (b) Coleta de percolado. (c) Medição da altura da torta do leito</i>	45
<i>Figura 4.12: Representação da sequência de descarte, peneiramento e desidratação da espuma</i>	46
<i>Figura 4.13: Representação da sequência de descarte, peneiramento e adensamento da espuma</i>	48
<i>Figura 4.14: (a) Coleta da fração clarificada. (b) Ponto de coleta da fração clarificada a 15 cm do fundo. (c) Proveta para medição de frações de espuma.</i>	48
<i>Figura 4.15: Montagem do Teste no equipamento AMPTS II</i>	50
<i>Figura 5.1: Ilustração das variações da altura entre o NA operacional do reator e a borda da canaleta de</i>	

<i>descarte de espuma: a) $h_1 = 2$ cm para o reator operando com vazão mínima; b) $h_1 = 5$ cm para o reator operando com vazão máxima</i>	52
<i>Figura 5.2: Volumes de descarte obtidos em cada rotina de descarte, para cada frequência e nível de espuma h_1</i>	54
<i>Figura 5.3: Eficiência de remoção de espuma obtidos em cada rotina de descarte, para cada frequência e nível de espuma h_1</i>	55
<i>Figura 5.4: Gráfico de correlação entre a concentração de lodo na altura 2,5 m e a taxa de acumulação de espuma</i>	60
<i>Figura 5.5: Influência da concentração de lodo na altura 2,5 m sobre a taxa acumulação espuma</i>	60
<i>Figura 5.6: Variação do teor de sólidos ao longo do tempo de desidratação. (a) Diagrama de box-plot. (b) Gráfico de dispersão</i>	61
<i>Figura 5.7: Variação das relações de volume de espuma no leito</i>	64
<i>Figura 5.8: Porcentagem de O&G em cada fração de espuma</i>	68
<i>Figura 5.9: Balanço de O&G nas etapas de peneiramento e desidratação da espuma</i>	68
<i>Figura 5.10: Porcentagens de volume de cada fração gerada no adensamento da espuma</i>	69
<i>Figura 5.11: Produção cumulativa de metano a partir da fração sobrenadante da espuma adensada</i>	72
<i>Figura 5.12: Fluxograma de descarte de espuma com adensamento proposto para uma ETE projetada para população de 100.000 habitantes.</i>	75

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 3.1: Resultados de caracterização físico-química e microbiológica da espuma de reatores UASB tratando esgoto doméstico</i>	17
<i>Tabela 3.2 : Taxas de acumulação de espuma na diferentes zonas do reator UASB</i>	19
<i>Tabela 3.3 : Principais possibilidades e benefícios do uso da espuma gerada em ETEs para propósitos energéticos</i>	27
<i>Tabela 4.1: Condições das diferentes rotinas de descarte testadas durante a fase 2 da etapa 1</i>	42
<i>Tabela 5.1: Condições operacionais e eficiências de remoção de espuma durante a etapa exploratória</i>	51
<i>Tabela 5.2: Condições operacionais e resultados das diferentes rotinas de descarte testadas</i>	56
<i>Tabela 5.3: Volumes de cada fração de espuma gerados no descarte</i>	57
<i>Tabela 5.4: Concentrações medianas de sólidos totais e voláteis das frações de espuma</i>	58
<i>Tabela 5.5: Porcentual em massa de cada fração de espuma gerados no descarte</i>	59
<i>Tabela 5.6: Teor de O&G das frações de espuma no descarte e desidratação</i>	67
<i>Tabela 5.7: Caracterização físico-química da fração de espuma clarificada e comparação com valores de esgoto sanitário da literatura</i>	70
<i>Tabela 5.8: Caracterização dos substratos e do inóculo utilizados nos testes BMP</i>	71
<i>Tabela 5.9: Condições da montagem dos testes AMPTS II</i>	72
<i>Tabela 5.10: Rendimentos médios de metano a partir da fração sobrenadante da espuma adensada</i>	73
<i>Tabela 11: Avaliação da alternativa de biometanização da fração flutuante da espuma.</i>	74

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AMPTS II: Automatic Methane Potential Test System

BMP: Biochemical Methane Potential

CePTS: Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento

DBO: Demanda bioquímica de oxigênio

DESA: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental

DQO: Demanda química de oxigênio

ETE: Estação de Tratamento de Esgotos

FBP: Filtro Biológico Percolador

NBR: Norma brasileira

O&G: Óleos e Graxas

ST: Sólidos Totais

STV: Sólidos Totais Voláteis

STf: Separador trifásico

SSed: Sólidos sedimentáveis

TDH: Tempo de detenção hidráulica

UASB: *Upflow anaerobic sludge blanket* (reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo)

UFMG: Universidade Federal de Minas Gerais

RALF: Reator Anaeróbio de Lodo Fluidizado.

1 INTRODUÇÃO

Na maioria dos países em desenvolvimento, a situação do esgotamento sanitário é bastante precária. Em 2010, a porcentagem da população brasileira com acesso a condições adequadas de esgotamento sanitário era de 39,7%; tal valor resulta em milhões de pessoas vivendo em ambientes insalubres e expostos a diversos riscos que podem comprometer sua saúde (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2013)

Considerando a problemática quanto à ausência de tratamento de esgotos no Brasil, a implantação de Estações de Tratamento de Esgotos torna-se uma necessidade fundamental para a melhoria da saúde pública. Entretanto, quanto aos sistemas existentes, têm-se importantes desafios para sua expansão, operação, manutenção, atendimento à legislação, sustentabilidade ambiental e aproveitamento de subprodutos, dentre outros (VON SPERLING, 2014).

Nos países da América Latina e do Caribe -ALC o crescimento populacional tem ultrapassado a capacidade dos governos locais e nacionais para atender as demandas de abastecimento de água e esgotamento sanitário. Ademais, o crescimento urbano não planejado e o desequilíbrio entre serviços de água e tratamento, têm levado a que nestes países somente se trate 15% dos esgotos municipais (NOYOLA *et al.*, 2012).

Os principais tipos de tratamento implantados nos países da ALC são baseados em processos biológicos aeróbios. No estudo mencionados por Noyola *et al.* (2012) avaliando tipologias de tratamento de esgoto, foi encontrado que os lodos ativados tratam 58% do total de esgoto nestes países. No entanto, é sabido que esta tecnologia representa altos custos de instalação, manutenção e operação em ETEs, na maioria dos casos insustentáveis para as condições de países em desenvolvimento.

Essa situação tem contribuído no crescimento e consolidação dos sistemas de tratamento anaeróbio. Notadamente, os reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), cujo desenvolvimento foi nas décadas dos 70/80 na Holanda, passaram a ser amplamente utilizados em países de clima tropical como Brasil, Colômbia, Índia, e países do oriente Médio e África (CHERNICHARO, 2007). Este crescente interesse nos reatores UASB é principalmente devido à simplicidade da tecnologia, baixo requerimento de espaço, baixa produção de lodo

de excesso e balanço de energia positiva em comparação com as tecnologias de tratamento convencional de tratamento aeróbio (VAN LIER *et al.*, 2015).

No contexto mundial, as altas demandas energéticas pela industrialização e crescimento urbano, como também a preocupação crescente pelo esgotamento dos combustíveis fósseis e o aquecimento global, têm trazido grande interesse na implantação de tecnologias de baixa demanda energética. Segundo van Lier *et al.* (2015) usando sistemas de tratamento anaeróbio em lugar de aeróbio se tem uma economia 1kW.h (energia fóssil) kg⁻¹ DQO removida.

Apesar das vantagens dos reatores UASB em comparação com outros sistemas, ainda se tem desafios importantes em aspectos de aprimoramento da tecnologia, destacando-se entre eles o controle e gerenciamento da espuma acumulada no interior do STf. Neste sentido, foi proposta esta pesquisa com o objetivo principal de estabelecer rotinas de descarte de espuma acumulada no interior do STf, que possam ser implementadas de forma eficiente em reatores UASB. Além disso, apresentar alternativas para o gerenciamento deste subproduto visando a redução de custos de tratamento e impactos ambientais.

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

Estabelecer protocolos de descarte e desidratação da espuma que se acumula no interior de separadores trifásicos de reatores UASB, visando melhorar o gerenciamento desse subproduto em estações de tratamento de esgoto doméstico.

2.2 *Objetivos específicos*

Objetivo 1: Estabelecer parâmetros operacionais otimizados (frequência de descarte, nível da interface espuma/biogás em relação à caneleta e volume de descarte em relação ao volume de reator) para um sistema hidrostático de remoção de espuma do interior do separador trifásico de reator UASB.

Objetivo 2: Avaliar o processo de desidratação da espuma em um sistema de peneiramento e leito de secagem e estabelecer um balanço de massa de O&G nas diferentes etapas do processo.

Objetivo 3: Avaliar o desempenho de uma unidade de pré-adensamento da espuma descartada, visando estabelecer um fluxograma de gerenciamento que possibilite a recirculação da fração clarificada para o reator UASB e o aproveitamento energético da fração sobrenadante.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Reatores UASB

Essencialmente, o processo consiste de um fluxo ascendente de esgotos através de um leito de lodo denso e de elevada atividade. O esgoto entra pelo fundo e o efluente deixa o reator através de um decantador interno localizado na parte superior do reator (CHERNICHARO, 2007). Conta com duas zonas de estabilização da matéria orgânica denominadas manta de lodo e leito de lodo. A parte superior do reator é dotada de um dispositivo (Separador trifásico-STf) para separação de gás, líquido e sólidos (Figura 3.1)

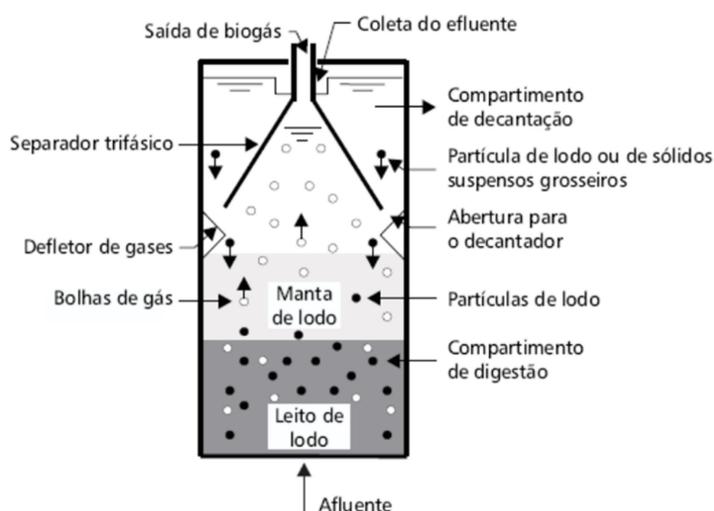


Figura 3.1: Configuração esquemática de reator UASB

Fonte: Chernicharo, 2007.

Atualmente existem centenas de plantas em escala plena em várias partes do mundo tropical, notavelmente na América Latina e Índia. De acordo com o estudo de Noyola *et al.* (2012), que inventariou uma amostra de 2.734 plantas de tratamento de esgotos em seis países da América Latina e do Caribe (Brasil, Chile, Colômbia, Guatemala, México, Republica Dominicana), se encontrou que os reatores UASB ocupam a terceira posição com 493 unidades (17%). Todavia, sabe-se que a quantidade de reatores UASB é muito maior, pois o estudo reportado anteriormente trabalhou com uma amostra e não com a totalidade dos sistemas de tratamento implantados nos diferentes países.

As principais vantagens da tecnologia de reatores UASB estão associadas à baixa produção de

lodo de excesso e ao baixo ou nulo consumo de energia, fatores que conduzem a uma diminuição significativa dos custos operacionais, quando comparados com os sistemas de lodos ativados (CHERNICHARO *et al.*, 2015). Outras vantagens destes sistemas são a simplicidade da tecnologia, baixo requerimento de espaço e a produção de biogás (VAN LIER *et al.*, 2015).

No entanto, apesar das vantagens destes sistemas, ainda persistem algumas limitações que precisam ser resolvidas, especialmente em aspectos de projeto, operação e manutenção dos reatores UASB. Na Figura 3.2 são apresentados os principais tópicos de interesse nas pesquisas de aprimoramento do desenho e operação de reatores UASB, destacando-se como de grande importância a acumulação de espuma, o gerenciamento de biogás e gás residual, o pós tratamento e a recuperação de energia (CHERNICHARO *et al.*, 2015).

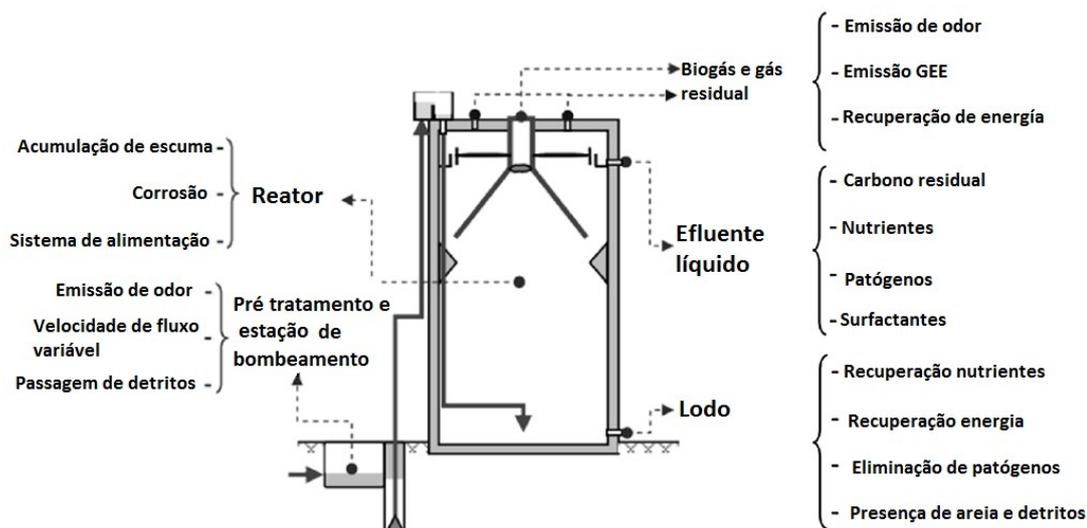


Figura 3.2: Tópicos de interesse para o melhoramento dos reatores UASB tratando esgoto doméstico

Fonte: Cherinicharo *et al.*(2015)

3.2 Escuma

3.2.1 Definição, formação e problemas operacionais da espuma em reatores UASB

3.2.1.1 Definição da espuma

De maneira geral, a espuma pode ser entendida como uma camada de materiais em condição flutuante que se desenvolve em biorreatores (SOUZA, 2006). A espuma pode conter óleos

vegetais e minerais, gorduras animais, cera, sabão, restos de alimentos, casca de frutas, cabelo, papéis e algodão, filtros de cigarro, materiais plásticos, preservativos, partículas de areia e materiais similares (TCHOBANOGLIOUS & BURTON, 1991).

3.2.1.2 Formação da espuma em reatores UASB

Em estações de tratamento de esgotos, as fontes de formação de espuma e os dispositivos de remoção variam de acordo com o tipo de tratamento e suas operações unitárias. A espuma é gerada principalmente nos tanques de pré-aeração, decantadores primários e secundários. Em decantadores primários, a quantidade de espuma depende da natureza do sistema de coleta e se são recebidas águas residuárias industriais. (TCHOBANOGLIOUS; BURTON, 1991).

Entre as razões que causam a formação de espuma estão: insuficiente mistura e calor, elevado conteúdo de óleos e graxas no afluente, bruscas flutuações de temperatura, recirculação de sólidos digeridos, pobre controle da carga aplicada, e altas concentrações de ácidos graxos (HALALSHEH *et al.*, 2005). Também o sistema de gradeamento, uma vez que quanto maior espaço entre barras maior quantidade de sólidos grosseiros ingressarão ao reator (ROSS, 2015).

3.2.1.3 Problemas operacionais da espuma

Vários autores concordam que a espuma é um dos principais problemas operacionais nos reatores anaeróbios, além de ocasionar uma diminuição da eficiência do tratamento (SOUZA, 2006; CHERNICHARO, 2007; PEREIRA, 2007; ROSS, 2015). Devido ao alto teor de matéria orgânica não degradada e presença de diferentes materiais que não são retidos pelo sistema preliminar de tratamento, ocorre a atração de vetores e emissão de maus odores (ROSS, 2015).

A espuma formada no interior do separador trifásico tem sido considerada mais problemática e de maior dificuldade de remoção que a espuma que se acumula nos decantadores. Em alguns casos, essa camada acumulada pode bloquear a passagem natural do biogás, e ocasionalmente pode resultar num escape parcial de biogás até a zona de sedimentação, comprometendo a retenção de sólidos e conduzindo à deterioração da qualidade do efluente (LETTINGA & HULSHOFF, 1991; SOUZA *et al.*, 2006).

3.2.2 Características físico-químicas e microbiológicas

As características físico-químicas da espuma dos reatores UASB são bastante heterogêneas e complexas, ressaltando-se as altas concentrações de DQO, DBO, sólidos e óleos e graxas (O&G), bem como elevadas concentrações de microrganismos patogênicos. Na Tabela 3.1, são apresentados alguns resultados reportados na literatura para espumas da zona de decantação e do separador trifásico.

Tabela 3.1: Resultados de caracterização físico-química e microbiológica da espuma de reatores UASB tratando esgoto doméstico

Parâmetro	Faixas	Tipo de espuma	Referência
DQO (g.L ⁻¹)	38,0 - 128,4	Separador trifásico	Santos (2014)
	97,0 - 111,0**	Decantador	Ross <i>et al.</i> (2013)
ST (g.L ⁻¹)	102,5 - 287,6	Separador trifásico	Santos (2014)
ST (%)	18,2 - 18,7**	Decantador	Ross <i>et al.</i> (2013)
STV (g.L ⁻¹)	67,0 - 187,3	Separador trifásico	Santos (2014)
STV (%)	11,9 - 13,0**	Decantador	Ross <i>et al.</i> (2013)
STV/ST	0,71 - 0,74	Decantador	Ross <i>et al.</i> (2013)
STV/ST	0,69	Separador trifásico	Santos (2014)
DBO (g.L ⁻¹)	26,0 ± 8,0*	Separador trifásico	Ross <i>et al.</i> (2013)
	26,0 - 29,0**	Decantador	Ross <i>et al.</i> (2013)
DQO/DBO	3,8 - 4,5	Decantador	Ross <i>et al.</i> (2013)
pH	6,2-7,2	Decantador	Ross <i>et al.</i> (2013)
Coliformes termotolerantes (UFC.g ⁻¹)	22.337 - 38.698**	Decantador	Ross <i>et al.</i> (2013)
<i>Salmonella spp.</i> (UFC.g ⁻¹)	3.844 - 103.015**	Decantador	Ross <i>et al.</i> (2013)
O&G (g.L ⁻¹)	0,061 - 2,154	Separador trifásico	Santos (2014)
O&G (g/kg de ST)	28 - 66**	Decantador	Ross (2015)
Proteínas totais(g.L ⁻¹)	19,5 - 51	Decantador	Souza (2006)
Carboidratos totais (g.L ⁻¹)	6 - 14,8	Decantador	Souza (2006)
Lipídeos (g.L ⁻¹)	14,9 - 28,7	Decantador	Souza (2006)

Notas: **Valores médios das ETE Atuba Sul e ETE Padilha Sul - Paraná
*média e desvio padrão

Além dos estudos de caracterização físico-química da espuma reportados na Tabela 3.1, foram realizados também estudos de caracterização microbiológica, tendo sido identificados diversos micro-organismos na espuma de decantadores de reatores UASB, conforme reportado por GARCIA *et al.* (2012): Cianobacterias (Phormidium), Euglenofitas, diatomáceas, bactérias oxidadoras de sulfeto (Beggiatoa e Thiotrix). Além disso outros gêneros envolvidos na redução de nitrato, oxidação de metano, bem como desnitrificantes.

Segundo o estudo de Ross *et al.* (2013) a espuma possui uma alta relação STV/ST, por isso,

qual deve passar por um processo digestão. Ademais, a relação DQO/DBO da espuma mostrou que sua degradação é mais difícil que a do esgoto doméstico, que tradicionalmente apresenta a relação média de 2,0. Também foram avaliados vários elementos metálicos (Ba, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni e Zn), encontrando concentrações inferiores aos limites estabelecidos pela resolução SEMA 21/2009.

3.2.3 Biodegradabilidade anaeróbia

Estudos de biodegradabilidade anaeróbia da espuma da zona de decantação foram realizados por Souza (2006), que encontrou porcentagens de degradação de DQO de espuma desintegrada em moinho acima de 60% em condições de TDH do reator UASB de 5 a 9 horas. Além disso, o autor encontrou que o incremento da velocidade ascensional no reator UASB produziu uma redução na biodegradabilidade da espuma.

Por outro lado, Santos (2014), realizando testes de biodegradabilidade anaeróbia da espuma do interior do STf, encontrou rendimentos de metano nas faixas de 464 a 550 mLCH₄.gSTV⁻¹ usando lodo anaeróbio de UASB como inóculo. No entanto, nos testes onde não foi adicionado lodo como inóculo a produção de metano foi muito baixa.

3.2.4 Acumulação de espuma em reatores UASB

Dentre os principais problemas operacionais dos reatores UASB, encontra-se a acumulação de espuma, a qual pode ocorrer em dois locais distintos: i) no interior do separador trifásico, na interface de liberação dos gases formados durante a digestão anaeróbia; e ii) na superfície do decantador (CHERNICHARO, 2007). Na Figura 3.3 é representada a espuma no interior do separador trifásico e do compartimento de decantação de reatores UASB.

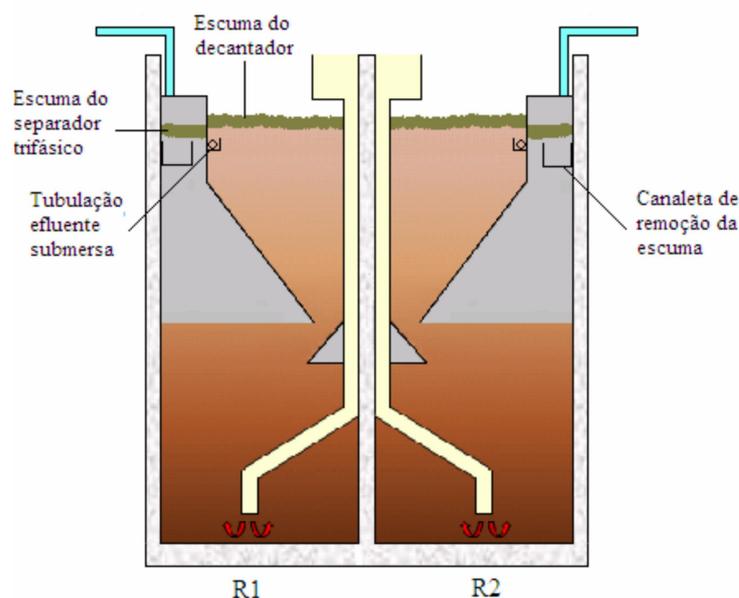


Figura 3.3 : Corte esquemático de reatores UASB geminados R1 e R2 e identificação dos tipos de espuma que podem acumular

Fonte: Souza (2006)

Taxas de acumulação de espuma têm sido medidas por diferentes autores, tanto para o interior do separador trifásico como para a zona de decantação. Os valores reportados em diferentes estudos têm-se mostrados diferentes (Tabela 3.2). Esta variação possivelmente é devida à falta de metodologia consolidada para a avaliação da acumulação da espuma e também pelas diferenças inerentes a cada sistema (CHERNICHARO *et al.*, 2015)

Tabela 3.2 : Taxas de acumulação de espuma na diferentes zonas do reator UASB

Tipo de espuma	Taxa de acumulação		Referência
	Valor	Unidade	
Decantador	100	mL.d ⁻¹	Versiani (2005)
	4-8	cm.ano ⁻¹	Van Handel e Lettinga (1994)
	1,0-73,6	gST.kgDQO _{aplicada} ⁻¹	Souza (2006)
Separador trifásico	12,5	cm.ano ⁻¹	Van Handel e Lettinga (1994)
	0,11-1,26	gST.kgDQO _{aplicada} ⁻¹	Souza (2006)
	0,15-1,32	gST.kgDQO _{aplicada} ⁻¹	Pereira (2012)
	3,97	ml _{escuma} .kgDQO _{aplicada} ⁻¹	Pereira <i>et al.</i> (2013)
	6,79 -10,33	ml _{escuma} .kgDQO _{aplicada} ⁻¹	Santos (2014)
Separador trifásico mais Decantador	4,82 - 105,3	gST.kgDQO _{aplicada} ⁻¹	Ross (2015)

Fonte: Adaptado Chernicharo *et al.* (2015)

A adequada operação nos reatores UASB é um fator que influi na quantidade de espuma gerada nestes sistemas, por exemplo, a não retirada do lodo excedente com a frequência adequada provoca maior perda de sólidos para o compartimento de decantação, o que pode contribuir para a agregação desses sólidos à camada de espuma.

A espuma acumulada em decantadores de sistemas UASB ocorre em taxas usualmente baixas, pelo qual a liberação desta espuma, juntamente com o efluente do reator, não implicaria em qualquer deterioração significativa da qualidade do efluente. Quanto à remoção da espuma no interior do separador trifásico, o mesmo autor recomenda a retirada da espuma com uma frequência quinzenal, a depender das características de concentração e de qualidade do afluente (CHERNICHARO, 2007).

A acumulação de espuma na zona de decantação de reatores UASB foi observada em 25% das ETEs do Distrito Federal. Além disso, foi evidenciado um efeito na minimização da espuma com a chuva (RAMOS, 2008). Esta mesma associação foi verificada no estudo de Souza (2006) em um reator UASB em escala de demonstração (vazão média afluente de $36,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$).

Ross (2015), avaliando o efeito da velocidade ascensional na formação de espuma em três reatores operando com velocidades ascensionais de $0,69$, $0,57$ e $0,46 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, encontrou que o reator que funcionou com menor velocidade ascensional ($0,46 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$) formou 3 vezes mais espuma na área de decantação e 4,8 vezes mais espuma no interior do STF que o reator que funcionou com maior velocidade ascensional ($0,69$). De acordo com esse estudo, a velocidade ascensional inferior permitiu maior degradação da matéria orgânica e conseqüentemente maior produção de lodo e de biogás que causou a flotação do lodo permitindo sua presença na espuma.

3.2.5 Influência do descarte de lodo na taxa de acumulação de espuma

Quando em reatores UASB não são aplicados descartes de lodo excedente com frequências adequadas, se produz perda de sólidos até o compartimento de decantação do reator, que tem sido associado com o incremento das taxas de acumulação de espuma (SOUZA, 2006; RAMOS, 2008). Além disso, Ramos (2008), em seu estudo de avaliação dos reatores UASB do Distrito Federal, observou que quanto maior o intervalo de tempo entre dois descartes

sucessivos de lodo, a espuma acumulada se tornava mais espessa e densa. No caso específico destas ETEs estudadas (ETE Gama) se teve a formação de uma camada de cerca de 20 cm de espessura, após um mês no qual foi interrompido o descarte de lodo.

Ross (2015) avaliou o efeito da retirada de lodo em três reatores operando com a mesma velocidade ascensional e frequências de retiradas de lodo de 3 vezes por semana, semanal e a cada 15 dias, encontrando respectivamente para cada frequência, taxas de acumulação de espuma de 45,3, 66,3 e 105,3 gST.kgDQO⁻¹.d⁻¹. O reator UASB que sofreu retiradas de lodo a cada três dias produziu 2 vezes menos espuma na área de decantação e 4,5 vezes menos no interior do STF, que o reator que tinha retiradas quinzenais. Além disso, a espuma produzida possuía um teor de O&G inferior, 1.127 mg.kg⁻¹ contra 1.413 mg.kg⁻¹, o que indica que ocorre uma migração destes compostos do esgoto para a espuma quando a quantidade de lodo no interior do reator é maior.

3.2.6 Controle de espuma em reatores UASB

A falta de dispositivos adequados de remoção de espuma impõe sérias dificuldades no adequado manejo da espuma que se acumula no interior do separador trifásico de reatores UASB. Este pode ser o maior problema em vários dos reatores UASB que foram projetados e construídos nos últimos anos. Só recentemente os reatores UASB têm sido desenhados com adequados dispositivos de remoção de espuma (CHERNICHARO *et al.*, 2015).

3.2.6.1 Remoção de espuma

O procedimento de remoção da espuma do interior dos reatores UASB é geralmente realizado através de um mangote de sucção, acoplado a caminhão limpa fossa. De acordo com Ross (2015) no estudo de avaliação das ETEs no estado de Paraná se teve que um 67,89 % realizam a retirada de espuma com caminhão limpa-fossa, 28,44 % a fazem manualmente e 3,67 % utilizam outras formas como um sistema hidráulico para remoção e tubo coletor de espuma.

Para os descartes de espuma, usualmente o reator tem uma escotilha de inspeção localizada acima do separador trifásico. A presença destas escotilhas de fechamento hermético possibilita a identificação da necessidade de remoção de material, e também a medição da espessura da camada acumulada (ROSA *et al.*, 2013).

Essa atividade pode ser insalubre, visto que ocorre exposição dos operadores a gases como o

sulfeto de hidrogênio, durante o procedimento de remoção, além de gerar altos custos pela contratação do caminhão como também da mão de obra auxiliar para a retirada completa da espuma.

A ineficiência de remoção de espuma de reatores UASB leva à retirada de volumes excessivos e desnecessários que devem ser tratados na ETE, o que finalmente reflete no aumento de custos operacionais. Segundo Ramos (2008) a ineficiência de remoção de espuma na ETE Gama-DF, levou a que grandes volumes de efluente fossem descartados para a lagoa de lodo, com consequentes sobrecargas e interrupções nas unidades de desaguamento mecânico. Isto teve um sensível incremento em custos de mão de obra, energia elétrica e produtos químicos.

O principal documento de referência é a Norma técnica brasileira de projeto hidráulico e sanitário de plantas de tratamento de águas residuais - ABNT NBR 12209:2011, na qual se tem estabelecidos os principais critérios de desenho de reatores UASB, no entanto, no assunto da espuma simplesmente está contemplado que estes devem ter dispositivos para sua remoção.

3.2.6.2 Canaleta de descarte do interior do separador trifásico

Na evolução das alternativas de aprimoramento de reatores UASB, um dos dispositivos usualmente considerados nos projetos é a canaleta de remoção de espuma do interior do separador trifásico (Figura 3.4).

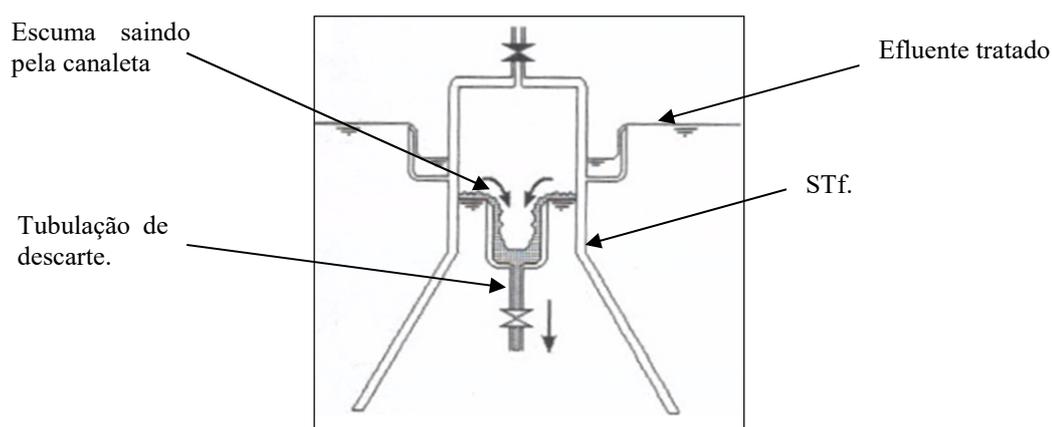
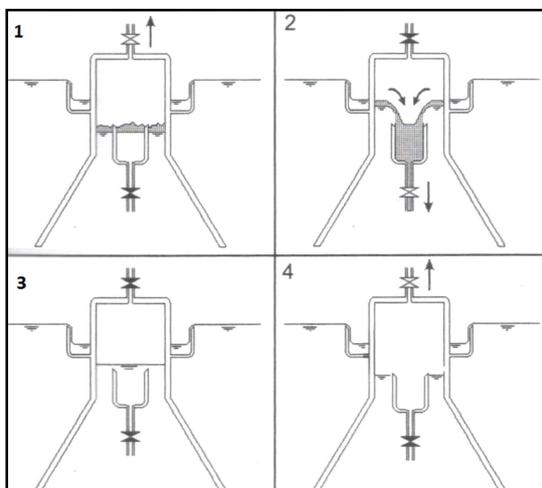


Figura 3.4 : Canaleta do interior do STf para descarte de espuma

Fonte: Chernicharo (2007)

Essa canaleta pode ser aproveitada para a realização de uma remoção hidrostática da espuma. O procedimento de remoção hidrostática é baseado numa alteração no nível de água dentro do separador trifásico para produzir o vertimento da espuma na canaleta de descarte a qual dirige

a espuma a uma tubulação de drenagem de espuma do reator. A alteração no nível de água dentro do separador trifásico é alcançada pelo incremento ou diminuição da pressão na linha de gás situada entre o separador trifásico e o selo hídrico (Figura 3.5).



1. Níveis de espuma durante a operação normal do reator (linha de gás pressurizada, de modo a manter o nível de espuma cerca de 5 cm abaixo da borda superior da canaleta interna).
2. Elevação do nível de espuma, conseguido com o alívio da pressão da linha de gás, de forma a possibilitar a entrada de espuma na canaleta interna.
3. Fechamento do registro de esgotamento da canaleta interna.
4. Aumento da pressão da linha de gás, retornando à condição operacional mostrada em “1”.

Figura 3.5 : Representação esquemática de dispositivo para remoção hidrostática de espuma, pela redução da pressão de biogás.

Fonte: Chernicharo (2007).

Recentemente, este mecanismo foi testado com bons resultados na ETE Laboreaux, Itabira-MG, onde foram encontradas eficiências de remoção com valores entre 90% e 95% nas melhores condições operacionais (ROSA *et al.*, 2012) e entre 60% e 90% (SANTOS, 2014).

Em alguns projetos nos quais a canaleta não tem sido construída devidamente nivelada, pode-se conduzir a problemas de fluxos preferenciais dentro do compartimento de decantação do reator UASB, bem como a acumulação de espuma no lado da canaleta posicionadas no nível mais alto (CHERNICHARO *et al.*, 2015).

3.2.6.3 Frequência de remoção de espuma

A frequência de remoção de espuma de reatores UASB é geralmente determinada de forma empírica pelas equipes de operação da ETE. Esta situação foi relatada por Ramos (2008) no seu estudo de avaliação de 12 ETEs no Distrito Federal-Brasil, quando foram identificadas as seguintes frequências de remoção: 16,67% (semanal); 16,67% (quinzenal); 8,33% (mensal); 25% (outra); e 33% não há frequência de descarte. Além disso, o autor relata que algumas ETEs incluídas na categoria de “outras frequências de descarte – 25%” praticam o descarte de

escuma juntamente com o descarte do lodo de fundo.

Segundo Ross *et al.*(2013), das 203 ETEs operadas pela SANEPAR se teve que 56,2% utilizam reatores tipo RALF e 38,4% reatores tipo UASB. Destas se identificou que realizavam descarte de espuma em frequências diária (3,9%), semanal (1,5%), quinzenal (3,9%), mensal (22,5%), semestral (3,9%), anual (8,4%), nunca (21,7%), outra (8,4%) e não informou (26,1%).

Estudos a fim de determinar rotinas adequadas de descarte de espuma foram realizados na ETE Laboreaux - Itabira M.G, atendendo uma população de 70.000 habitantes (ROSA *et al.*, 2012; Santos, 2014). Segundo Santos (2014) as frequências de descarte em dias alternados ou duas vezes por semana apresentaram-se mais eficientes.

3.2.6.4 Modificação do separador

Pereira (2007) avaliou a implantação de um segundo estágio de coleta de biogás objetivando o controle de espuma e remoção de matéria orgânica num reator em escala piloto. Os resultados demonstraram mais efetivo controle da formação de espuma do interior do STF no reator modificado em comparação com o reator convencional. O autor associou o resultado com a possibilidade de ocorrência da degradação da espuma e ou sua desestruturação e saída do separador trifásico. Posteriormente o mesmo autor (PEREIRA, 2012) avaliando diferentes condições hidrodinâmicas do reator modificado, encontrou que este apresentou um efetivo controle da acumulação de espuma no interior do STF, com uma redução em massa de ST, STV e DQO superior a 70%, 67% e 65% respectivamente, para TDH de 7 h, e 83%, 84% e 81% para TDH de 5 h.

Pereira *et al.*(2015) avaliaram um reator UASB com uma modificação do separador trifásico (maior área do compartimento de biogás e duas áreas de passagem para o decantador) a fim de verificar o efeito na acumulação de espuma no interior do mesmo. Os resultados foram promissores uma vez que a redução da espuma em termos de massa (ST) variou entre 50% até 93%, quando comparado com um reator UASB convencional.

3.2.6.5 Aplicação de enzimas

Santos (2014) avaliou o efeito da aplicação das enzimas Lipolase 100L e papaína Crua na

hidrólise de alguns compostos orgânicos da espuma gerada no interior do reator UASB, como também o efeito sobre a biodegradabilidade desse resíduo, com vistas ao aumento da produção de metano. Os melhores resultados para a aplicação de ambas enzimas foram obtidos na concentração de 1,0%, que mostraram incrementos de produção de metano da ordem de 36 e 78%, respectivamente, para as enzimas Lipolase e papaína bruta. Além disso as eficiências de remoção de DQO e O&G estiveram acima 70 e 62%, respectivamente.

Porém, o autor manifesta que o tratamento enzimático para a hidrólise de efluentes tem um elevado custo que não viabiliza este tratamento.

3.2.6.6 Sistema de diluição de espuma

É um sistema que consiste de um aspersor de efluente do próprio reator, bombeado sob pressão na espuma. Os ramais de aspersão são dispostos sobre a laje do coletor de gás, de forma que os bocais de aspersão dirijam seu jato contra a espuma formada, direcionando a mesma para o vertedor de descarte de espuma. Este sistema tem sido referenciado para a ETE Gama - DF (RAMOS, 2008).

3.2.7 **Gerenciamento da espuma**

Pouca é a informação existente na literatura sobre processos de gerenciamento da espuma de reatores UASB. No caso do Brasil, os estudos realizados no estado de Paraná (ROSS *et al.*, 2013) identificaram que as principais formas de gerenciamento da espuma são: leitos de secagem (31,4%), aterro sanitário (20%), vala de aterro na ETE (18,57%), bag (12%), outra ETE (15%) e mistura ao lodo (2,86%).

Outra das alternativas usuais de tratamento da espuma de reatores UASB consiste na sua disposição conjunta com o lodo produzido na ETE, para posterior desidratação em leitos de secagem. A espuma e lodo desidratados geralmente são transportados até aterro sanitário para disposição final ou realizada sua disposição em vala dentro da própria ETE. Também é encontrado o uso de uma lagoa anaeróbia para estabilização previa de lodo e espuma antes da etapa de desidratação (RAMOS, 2008).

No Brasil não se conta com normatividade estabelecida que dê diretrizes técnicas para as atividades de tratamento e disposição final de espuma em ETEs. As principais orientações são

tomadas da norma ABNT - NBR 12209:2011, no tocante a construção de leitos de secagem, no entanto, esta norma refere-se a leitos de secagem para lodos. Ademais, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12235 de 2010) pode dar orientação em aspectos de gerenciamento adequado da espuma. Esta Lei define a destinação final adequada como “*destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético.*”. Neste sentido Santos (2014) propôs algumas alternativas para o gerenciamento de espuma em concordância com a mencionada lei (Figura 3.6).

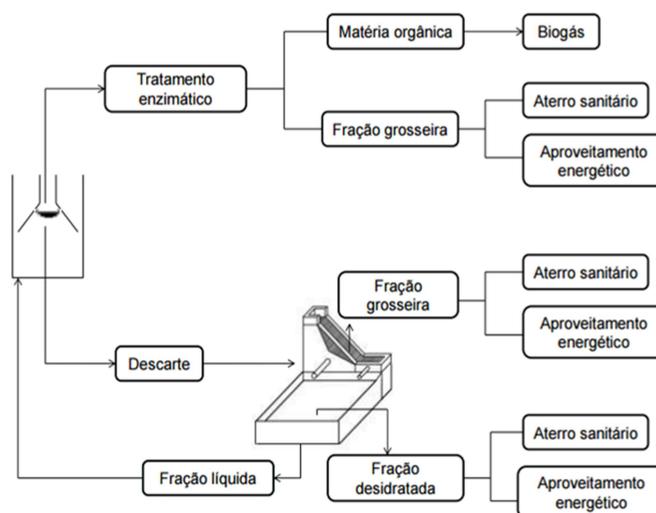


Figura 3.6 : Alternativas de gerenciamentos da espuma em ETES
 Fonte: Santos (2014).

Com base nas alternativas de gerenciamento acima apresentadas, se tem que antes da disposição da espuma em leito de secagem se inclui uma etapa de peneiramento para separar a alta quantidade de material grosseiro proveniente do esgoto bruto, que não foi retido nas grades do tratamento preliminar. A fração peneirada é desidratada diminuindo os custos de transporte e disposição até o aterro sanitário. De outra parte, o alto conteúdo de óleos e graxas da espuma abre a possibilidade de aproveitamento energético deste resíduo tanto nas frações desidratada como grosseira.

É claro que as alternativas que tem maior consonância com os princípios da Lei 12235 de 2010 são as que levam ao aproveitamento energético, no entanto, implicam um maior investimento tecnológico e de capacitação do pessoal.

3.2.7.1 Recuperação energética da espuma

A sustentabilidade energética das ETEs é um dos principais aspectos a serem considerados nas futuras ETEs. Em relação com a espuma devem ser dirigidas investigações para caracterizar este material e determinar seu potencial energético, ao mesmo passo que insere-se a disposição de espuma em rotinas operacionais das ETEs (CHERNICHARO *et al.*, 2015).

Segundo estudo realizado por Rosa *et al.*(2015), foram avaliadas as propriedades energéticas da espuma descartada e submetida a etapas de peneiramento e desidratação. A fração removida na peneira estática apresentou umidade de 84,5% e um Poder Calorífico Inferior - PCI, base de trabalho, de 0,8 MJ.kg⁻¹. Quanto à camada de espuma desidratada no leito de secagem, esta apresentou umidade média de 20,1% conferindo um Poder Calorífico Superior - PCS, base de trabalho, de 5,4 MJ.kg⁻¹. Quanto à composição elementar das duas espuma, encontrou-se que a espuma retida na peneira tinha melhores propriedades energéticas que a espuma retida no leito de secagem, uma vez que a primeira tinha maior conteúdo de carbono e hidrogênio na sua composição elementar e menor teor de cinzas na sua constituição. Além disso, este estudo sugere que a espuma retida na peneira poderia ser valorizada energeticamente mediante secagem, garantindo melhores resultados de PCI.

Segundo Chernicharo *et al.* (2015), estudos na área de recuperação energética de espuma estão ainda nas primeiras etapas. No entanto, a espuma após desidratação representa um potencial de energia que pode ser aproveitada para uso local, reduzindo substancialmente os custos de transporte para disposição final em aterros sanitários. No mesmo estudo, na Tabela 3.3, a seguir, estão apresentados os principais benefícios de recuperar a energia da espuma.

Tabela 3.3 : Principais possibilidades e benefícios do uso da espuma gerada em ETEs para propósitos energéticos

Benefício direto	Benefício indireto	Tipo de benefício
Redução de volume de material a ser disposto em aterro.	Redução de custos de transporte.	Econômico
	Redução de geração e emissão de GEE devido ao não envio para aterro sanitário.	Ambiental
Fonte de energia térmica devido a sua combustão	Potencial uso de calor em aquecimento e processos de higienização.	Econômico e Ambiental
	Potencial redução de volume do resíduo final.	Econômico e Ambiental

Fonte: Chernicharo *et al.* (2015)

3.3 Desidratação de espuma usando leitos de secagem em ETEs

Após a remoção da espuma gerada no reator UASB é necessário dar uma destinação correta a este resíduo. Neste sentido, algumas ETEs no Brasil têm considerado os leitos de secagem como uma etapa importante no gerenciamento deste resíduo, que possibilita a diminuição do volume e conseqüentemente diminuição de custos de transporte até o local de disposição final.

3.3.1 Princípios do processo de desidratação

O termo desidratação ou desaguamento é principalmente utilizado para definir uma das etapas do gerenciamento de lodo em estações de tratamento de esgotos, cuja finalidade é reduzir o volume de lodo em excesso por meio da redução de seu teor de umidade. A capacidade de desidratação varia com o tipo de lodo, e está diretamente relacionada ao tipo de sólido e à forma pela qual a água está ligada às partículas de lodo (GONÇALVES *et al.*, 2001).

O objetivo da desidratação de espuma é a remoção de umidade e redução de volume. Esse processo tem um impacto importante na redução de custos de transporte e disposição final do lodo. A espuma é usualmente disposta com o lodo produzido na estação, porém, em algumas estações é usada a disposição separada da espuma (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003).

3.3.2 Princípios de operação dos leitos de secagem

Nestes sistemas, a evaporação e a percolação são os principais mecanismos de remoção de água, o que demanda tempo de exposição do lodo às condições que resultam no desaguamento. A variação da capacidade de desidratação está diretamente relacionada com o tipo de sólido e com a forma com que a água está ligada às partículas do lodo. Embora sejam operacionalmente mais simples e baratos tais processos demandam maiores áreas e volumes para instalação em comparação com processos de desidratação mecânicos (GONÇALVES *et al.*, 2001).

No Brasil, devido à falta de uma norma específica para projeto e construção de leitos de secagem de espuma são usualmente adotadas as orientações da norma ABNT-NBR 12209.

3.3.3 Aplicação de leitos de secagem para desidratação da espuma

Quanto à desidratação da espuma gerada em tratamento de esgotos, tem sido encontrados poucos estudos reportados na literatura. Este fato pode estar associado a que a quantidade de espuma gerada é muito reduzida em comparação com o lodo, além disso, esta é geralmente misturada com o lodo e enviada para disposição final.

De acordo com Ross *et al.* (2013) os leitos de secagem com espuma se colmatam mais rapidamente que com lodo, além disso os leitos requerem o uso de uma camada maior de areia sobre os tijolos.

A desidratação de espuma descartada de reatores UASB em leitos de secagem, após pré-tratamento em peneira estática com abertura de 5 mm, foi estudada por Santos (2014), que encontrou um volume remanescente de aproximadamente 20% do volume inicial após 60 horas. Esse desempenho é considerado superior quando comparado com aquele do lodo biológico, no qual o tempo de desidratação pode se estender por mais de 20 dias. Ademais, não foi observado efeito prejudicial dos óleos e graxas em termos de colmatção do sistema drenante.

Ross (2015) avaliou a desidratação da espuma em leitos de secagem de duas ETEs, operadas pela SANEPAR: ETE Vassoural e ETE Menino Deus, com vazões afluentes de esgoto de 240 L.s⁻¹ e 63 L.s⁻¹, respectivamente, mostradas na Figura 3.7. Ressalta-se que o leito da ETE Vassoural, com uma área de 120 m², foi especialmente construído para a desidratação da espuma.



Figura 3.7 : Leito de secagem cheio com espuma: ETE Vassoural, Guarapuava-PR (Esquerda) e ETE Menino Deus, Quatro Barras - PR (Direita)

Fonte: Ross (2015)

Na ETE Vassoural, as concentrações médias de espuma descarregadas no leito variaram entre 0,4 - 3,1%. Dos descartes avaliados observou-se variação nos tempos de desidratação entre 7 e 36 dias, com concentrações finais de ST entre 17,8-26,6%. Entre o início e o final do processo de desaguamento a espuma variou de 0,8 a 0,5 na relação de STV/ST. Quanto na ETE Menino Deus, o teor de ST da espuma disposta no leito variou entre 3,3 e 8,6 %.

3.4 Processo de adensamento de espuma em ETEs

Não foram encontrados referências na literatura relativa ao uso de uma etapa de adensamento da espuma em ETEs. No entanto tem sido reportadas observações da separação deste material em três fases uma vez dispostos nos leitos de secagem com um espessamento do material no fundo do leito e na superfície e a formação de uma camada intermediária mais fluida (ROSS *et al.*, 2013). Foi tentada a drenagem desta camada intermediária, a fim de diminuir o tempo de desidratação, no entanto, o alto conteúdo de sólidos totais (1,3%) inviabilizou sua aplicação. Algumas orientações de desenho de dispositivos de controle de espuma contemplam a construção de uma “caixa de recebimento de espuma” para receber a espuma removida do reator e uma “caixa de concentração de espuma” para receber o sobrenadante da anterior (SOBRINHO, 2009). Da caixa de concentração de espuma o líquido separado deverá retornar ao UASB e a espuma concentrada poderá ser encaminhada para o tanque de lodo para desaguamento, ou ser encaminhada para disposição em aterro sanitário.

3.5 Antecedentes sobre estudo de espuma no DESA-UFMG

O Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA da Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG tem desenvolvido, por mais de dez anos, importantes pesquisas relacionadas com caracterização e alternativas de controle e gerenciamento da espuma gerada em reatores UASB. Na Figura 3.8 é apresentada uma linha do tempo com as principais pesquisas e resultados encontrados. Ressalta-se a evolução dos focos iniciais de caracterização e controle para o gerenciamento e aproveitamento energético.

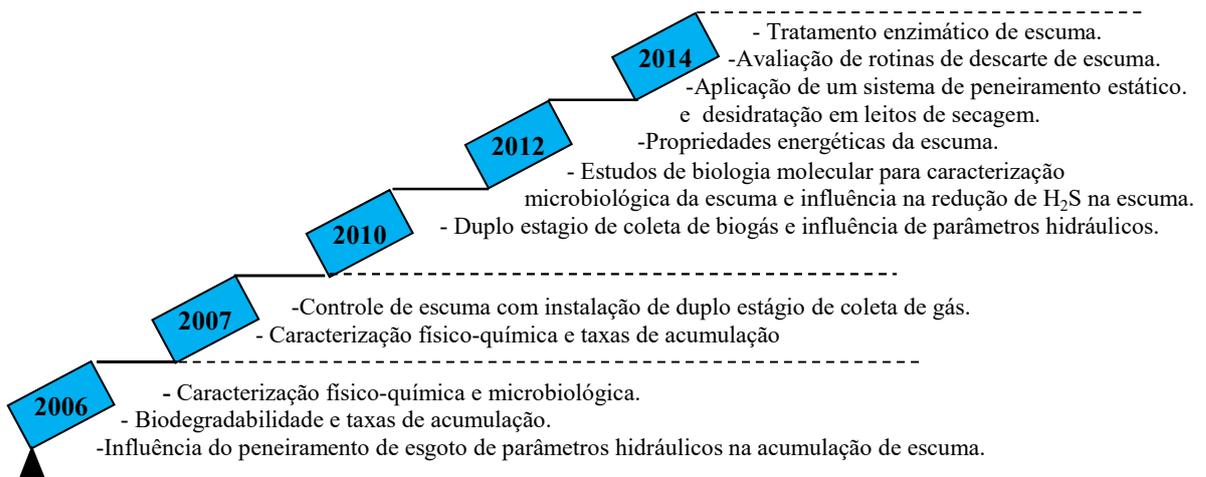


Figura 3.8: Antecedente de estudo sobre espuma no DESA-UFMG.

Fonte: Souza (2006), Pereira (2007), Souza (2010), Pereira (2012), Garcia (2014), Santos (2014).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A presente pesquisa foi desenvolvida em um aparato experimental instalado no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento UFMG/COPASA (CePTS), localizado junto à Estação de Tratamento de Esgotos do Arrudas (ETE Arrudas), em Belo Horizonte – MG. O aparato experimental consistiu de um reator UASB, equipado com dispositivo de remoção hidrostática de espuma, e de dispositivos externos destinados à segregação, quantificação e desidratação da espuma, conforme detalhado nos itens seguintes.

O reator UASB foi alimentado com uma pequena fração de esgoto afluyente à ETE Arrudas, após sua passagem pelo tratamento preliminar. Esta etapa, que tem por objetivo a remoção de sólidos grosseiros e areia, é composta por gradeamento (grade grossa manual e grade fina mecanizada) e desarenador.

4.2 Fluxograma da pesquisa e aparato experimental

O trabalho foi organizado e desenvolvido em etapas, de acordo com os três objetivos específicos estabelecidos para a pesquisa, seguindo o fluxograma da Figura 3.8. Os trabalhos de campo foram realizados entre os meses de fevereiro e dezembro de 2015.

A Etapa 1 foi subdividida em duas fases: fase exploratória, realizada entre 10/02 e 22/05/2015 (3,4 meses); e uma fase de comparação estatística, realizada entre 22/05 e 18/12/2015 (7 meses). As Etapas 2 e 3 foram realizadas concomitantemente à Fase 2 da Etapa 1, no período de maio a dezembro.

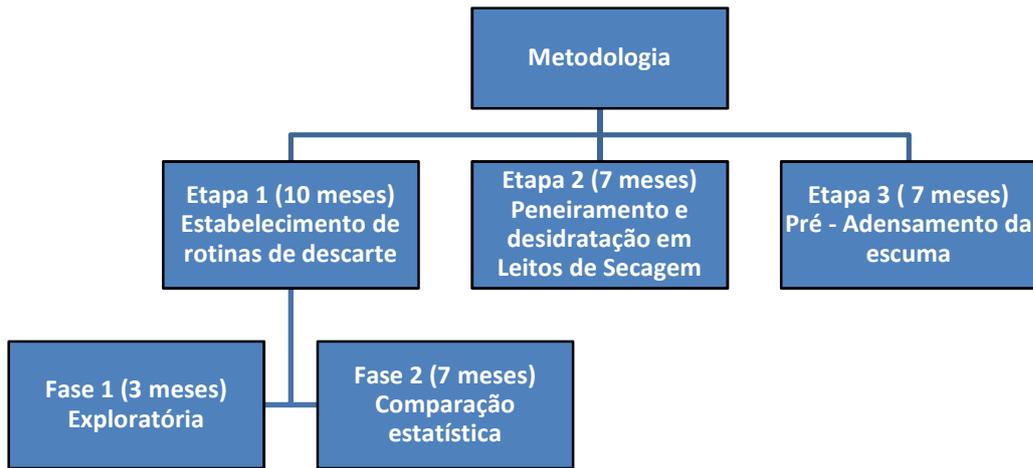


Figura 4.1 : Fluxograma das etapas experimentais da pesquisa

A Figura 4.2 apresenta o aparato experimental utilizado de acordo com cada etapa da pesquisa. Os principais componentes apresentados para a etapa 1 são o reator UASB, a peneira com malha de 2 mm e um tanque de 250 L. Enquanto que para as etapas 2 e 3 são apresentados os leitos de secagem em escala de bancada e o tanque de adensamento de espuma, respectivamente.

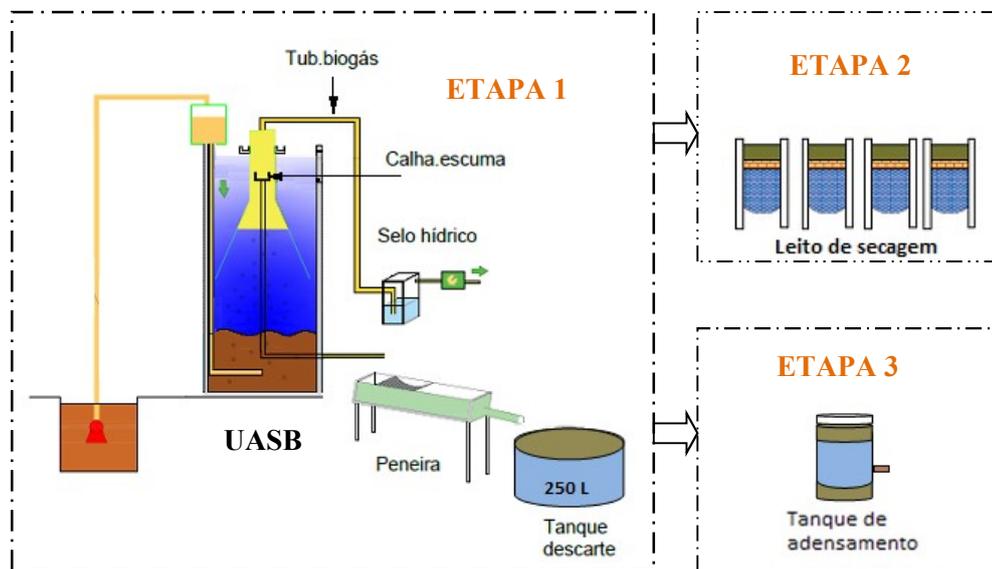


Figura 4.2 : Fluxograma general do aparato experimental por etapas desenvolvidas na pesquisa

4.3 Etapa 1: Estabelecimento de rotinas de descarte

4.3.1 Aparato experimental

O aparato experimental utilizado na Etapa 1 foi um reator UASB, dimensionado para um equivalente populacional de 380 habitantes (per capita de esgoto: $125 \text{ L.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$). O reator foi confeccionado em aço-carbono, com dimensões de 2,50 m (comprimento) x 1,40 m (largura) e 4,80 m (altura) (volume útil: $16,8 \text{ m}^3$). A vazão afluyente de esgoto obedeceu a um hidrograma típico, com vazões média, mínima e máxima de $45,5 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$, $23,0 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$ e $72,8 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$, respectivamente. O tempo de detenção (TDH) médio foi de 8,6 h. A espuma do interior do separador trifásico era coletada através de uma canaleta retangular de 0,10 m (largura) x 0,15 m (altura) x 1,35 m (comprimento) e 3% de inclinação.

A espuma descartada através da canaleta era encaminhada para uma peneira de aço com aberturas de 2 mm, por meio de uma tubulação em PVC (diâmetro 3"). Após passar pela peneira, a espuma era coletada num tanque em plástico de 250 litros (Figura 4.3-c).

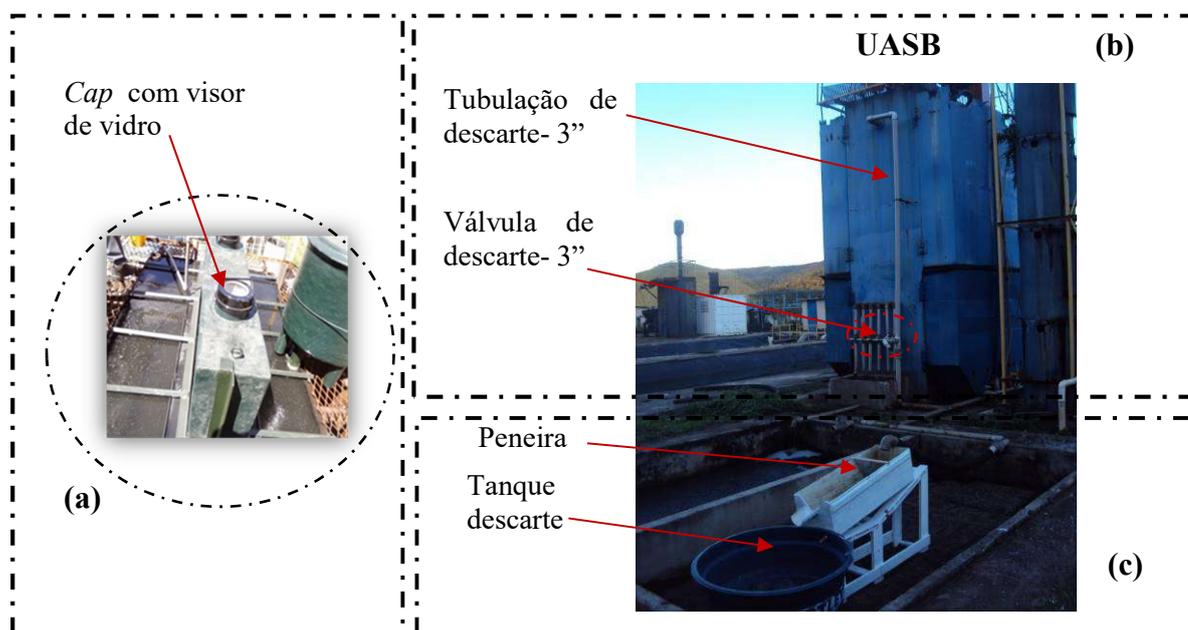


Figura 4.3: Visualização do aparato experimental: a) Caps de observação localizados na parte superior externa do STf; b) Reator UASB e tubulação de descarte de espuma; c) peneira e tanque de descarte

A parte superior do separador trifásico possuía dois caps em plástico com um visor de vidro (diâmetro 200 mm) para permitir a observação e retirada de espuma do interior do separador

trifásico. Fotografias da parte superior externa do STf e do dispositivo de peneiramento e quantificação de espuma são apresentados na Figura 4.3-a, anterior.

4.3.2 Sistema de remoção hidrostática de espuma

A remoção hidrostática da espuma do reator UASB foi realizada conforme o procedimento aplicado nos estudos realizados por Rosa *et al.* (2012). Este procedimento se fundamenta nos princípios da hidrostática conforme descrito na Figura 4.4. A pressão efetiva no ponto 2 (P_2), localizado a uma nível h_2 abaixo da superfície livre do líquido (zona de decantação do reator), é igual à pressão da coluna de água h_2 (m.c.a) mais P_1 (pressão atmosférica)¹. A pressão do líquido na interface espuma/biogás (P_3) também é igual a P_2 (o fluido está em equilíbrio, então a pressão no mesmo nível deve ser a mesma). Como o biogás exerce a mesma pressão em toda a linha de biogás, se tem que $P_3=P_4$ (sendo P_4 pressão na saída da tubulação de biogás no selo hídrico). Dado que $P_3=h_2+P_{atm}$ e $P_4=h_3+P_{atm}$, então $h_2=h_3$. A partir disto, fica demonstrado que é possível estabelecer um nível h_2 variando o nível de água do selo hídrico.

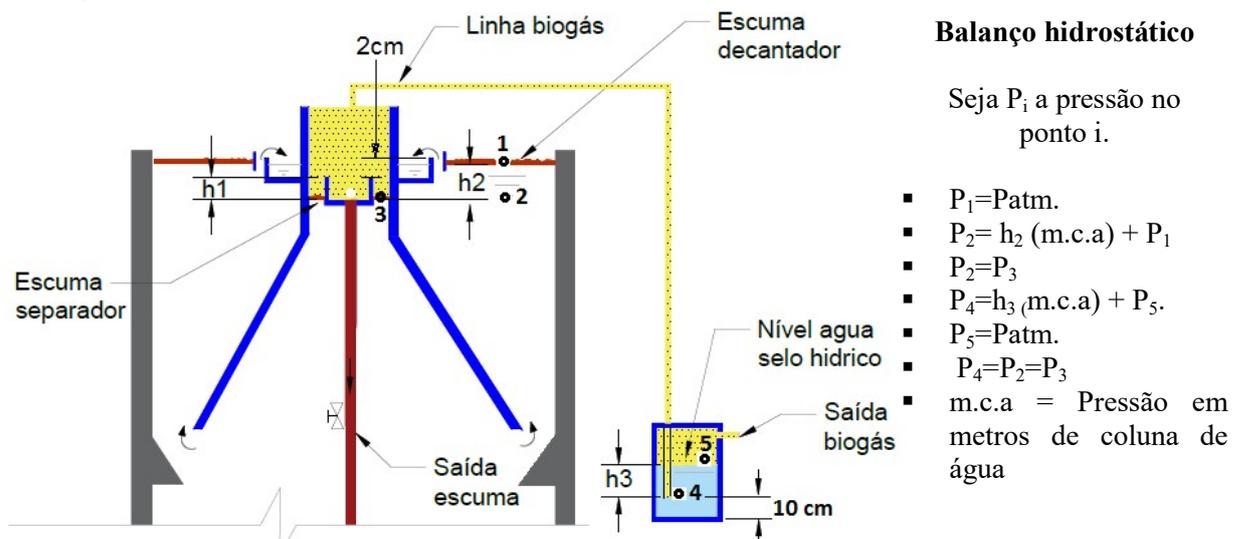


Figura 4.4: Identificação dos níveis e pressões hidrostáticas no sistema de remoção de espuma

¹ (BRUNETTI, 2008). Teorema de Stevin: A diferença de pressão entre dois pontos de um fluido em repouso é igual ao produto do peso específico do fluido pela diferença de cotas dos dois pontos.

Na Figura 4.5 apresenta fotografias da parte superior externa do STf (zona de decantação) e da canaleta de coleta de efluente e selo hidráulico.

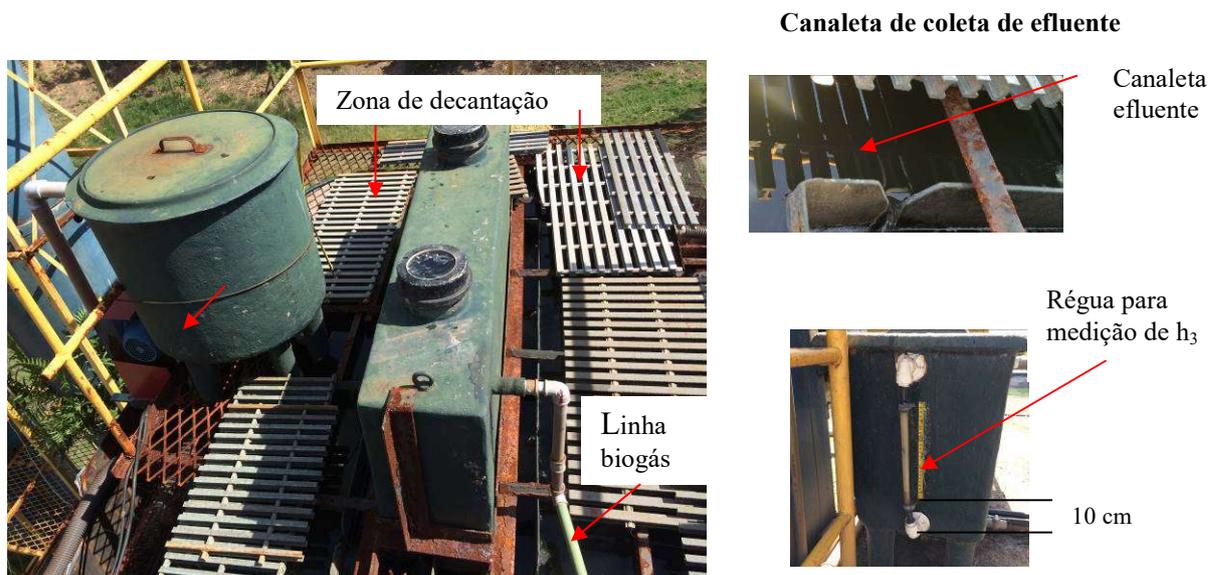


Figura 4.5: Principais dispositivos envolvidos no mecanismo de remoção hidrostática da espuma

O procedimento de descarte hidrostático de espuma é descrito a seguir:

- ✓ Estabelecer o nível h_1 variando o nível de água no selo hidráulico. O selo hidráulico tem uma mangueira externa transparente que, por vasos comunicantes, permite conhecer o nível de água no seu interior.
- ✓ Com a abertura da válvula de descarte é produzida uma liberação de pressão, com o conseqüente abaixamento do nível da espuma no interior do STf e posterior saída pela canaleta (Figura 4.6).

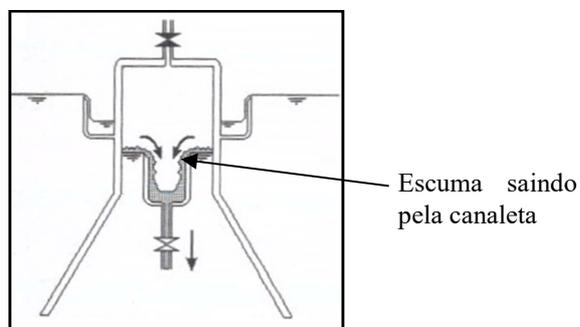


Figura 4.6: Ilustração da saída de espuma pela canaleta descarte
Fonte: Chernicharo (2007).

Externamente ao reator, a espuma passa por uma peneira estática (2 mm de abertura) para retirada da fração grosseira, sendo em seguida armazenada em um tanque plástico de 250 L (



Fig

ura 4.7).

Figura 4.7: Peneira estática para coleta da fração grosseira de espuma descartada

- ✓ A espuma remanescente no interior do STf é retirada manualmente com uma peneira manual (1 mm) e seu volume quantificado (Figura 4.8).



Figura 4.8: Coleta da espuma retida no STf por meio de peneira de amostragem de 1 mm.

- ✓ Após o descarte são geradas três frações de espuma: Escuma peneirada (fração que passa pela peneira); fração grosseira (fração retida na peneira); e espuma que fica retida no interior do STf, após a remoção hidráulica. Todas as três frações foram quantificadas volumetricamente e amostras foram tomadas para análises laboratoriais.
- ✓ A partir das análises de ST de cada fração é determinada a quantidade de espuma acumulada.

Na Figura 4.9 podem ser observadas as características das três frações de espuma e descrição da coleta de amostra.

<p><u>Escuma peneirada:</u> O volume é medido no tanque de descarte, a partir de medições do diâmetro e altura do líquido no tanque.</p>	
<p><u>Fração grosseira:</u> Material grosseiro que ficou retido na peneira de 2 mm de abertura. Sua coleta é realizada raspando o material.</p>	
<p><u>Escuma retida no separador trifásico:</u> Foi coletada introduzindo uma peneira de 1 mm de abertura através do Cap de observação e seu volume determinado num balde graduado.</p>	

Figura 4.9: Identificação da coleta das três frações de espuma descartada do STf

4.3.3 Amostragem e análise de sólidos das frações de espuma

As amostras coletadas eram encaminhadas para o laboratório de Análises Físico-químicas do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA/UFMG. A fim de homogeneizar as frações de espuma grosseria e de espuma retida no separador trifásico, foi usado um moinho de painelas vibratórias instalado no laboratório de Caracterização e Minérios e Materiais do Departamento de Engenharia de Minas - DEMIN/UFMG, seguindo a metodologia proposta por Santos (2014).

As coletas de amostras e análises de ST e STV foram realizadas usando os procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012), sendo usado para a espuma peneirada os métodos 2540-B e F. Para as frações grosseira e espuma retida no separador trifásico (após passagem pelo moinho) foi usado o método 2540-G.

4.3.4 Eficiência de remoção de espuma

A eficiência de remoção de espuma foi calculada com base na relação entre a massa de espuma descartada ($M_{ep} + M_{eg}$) e a massa total de espuma acumulada (M_{te}), em cada período de acumulação considerado (t), conforme equação seguinte.

$$E_{re} = \frac{M_{ep} + M_{eg}}{M_{te}} \times 100 \quad (\text{Equação 4.1})$$

Na qual:

E_{re} : eficiência de remoção de espuma (%)

M_{ep} : massa de espuma peneirada (gST)

M_{eg} : massa de espuma grosseira (gST)

M_{te} : massa total de espuma acumulada no período (gST)

4.3.5 Determinação da taxa de acumulação de espuma

A partir das medições de volumes das diferentes frações de espuma obtidas no descarte e suas correspondentes concentrações de sólidos totais, foram calculadas as taxas de acumulação de

escuma no interior do separador trifásico (g ST/dia) como a somatória das massas de sólidos totais (g ST) de cada fração, dividida pelo intervalo de tempo entre dois descartes consecutivos (dias).

$$M_{ep} = V_{ep} \times C_{ep} \quad (\text{Equação 4.2})$$

$$M_{eg} = V_{eg} \times C_{eg} \quad (\text{Equação 4.3})$$

$$M_{er} = V_{er} \times C_{er} \quad (\text{Equação 4.4})$$

$$M_{te} = M_{ep} + M_{eg} + M_{er} \quad (\text{Equação 4.5})$$

$$TAE = M_{te} / t \quad (\text{Equação 4.6})$$

Nas quais:

V_{ep} : volume de espuma peneirada

V_{eg} : volume de espuma grosseira

V_{er} : volume de espuma retida no STf

C_{ep} : concentração de espuma peneirada

C_{eg} : concentração de espuma grosseira

C_{er} : concentração de espuma retida no STf

M_{er} : Massa de espuma retida no STf (g ST) após a operação de descarte

t : período de acumulação de espuma (intervalo entre dois descartes consecutivos) (d)

TAE: taxa de acumulação de espuma (gST.d⁻¹)

A partir da carga média de DQO aplicada ao reator (kgDQO.d⁻¹), foi calculada a taxa de acumulação de espuma, em termos de gST. kgDQO⁻¹.

4.3.6 Fase 1: Avaliação exploratória do dispositivo de remoção hidrostática e definição de rotinas de descarte

Para a avaliação do dispositivo de remoção hidrostática da espuma foram considerados os quatro seguintes parâmetros operacionais:

- **Frequência de descarte:** É o número de dias entre dois descartes consecutivos. Foram

avaliadas frequências de descarte entre 2 e 17 dias.

- **Grau de abertura de válvula:** Abrindo a válvula em porcentagens de 25%, 50%, 100%. Cada operação de descarte podia contemplar a abertura de válvula uma ou mais vezes.
- **Tempo de descarte:** É a duração da operação de descarte. Geralmente o descarte finalizava quando não se observa mais escoamento da espuma pelo *cap* com visor de vidro.
- **Nível de espuma no interior do STf:** Altura entre a borda da canaleta de descarte e o nível da interface espuma/biogás no interior do separador trifásico h_1 (ver Figura 4.4). Esta altura variou de 2 cm acima e 5 cm abaixo da borda da canaleta.

Estes parâmetros foram selecionados a partir das experiências nos estudos realizados por Rosa *et al.* (2012) e Santos (2014).

Durante os descartes se observava através do *cap* com visor de vidro, o escoamento da espuma pela canaleta de descarte, como também, a quantidade que ficava retida no interior do STf.

Finalizados os descartes, se determinava o volume acumulado, volume descartado, volume retido no STf e eficiência de remoção de espuma. Nesta etapa, o volume acumulado foi determinado, considerando uma taxa média de acumulação de espuma no STf de 3 L.d^{-1} . Esta taxa de acumulação foi estimada mediante um teste em campo no qual se coletou um volume total de espuma no STf de 6 L, o qual foi produzido num período de 2 dias.

A eficiência de remoção de espuma (%), foi obtida da relação entre a espuma descartada (volume acumulado-volume de espuma retida no STf) e a espuma acumulada. Ressalta-se que a eficiência de remoção de espuma da fase 2 foi calculada com o procedimento descrito no item 4.3.4.

4.3.7 Fase 2: Avaliação das rotinas de descarte definidas e comparação estatística para definir a melhor alternativa

Com base nos resultados encontrados da fase exploratória, foram definidas quatro rotinas de descarte variando unicamente os níveis h_1 e a frequência de descarte (**Erro! Fonte de**

referência não encontrada.) Todos os descartes foram realizados com abertura de válvula 100% e tempo de descarte de 10 s. Nos casos em que se observava espuma retida no interior do STf após o descarte de 10 s, esperava-se um intervalo de 15 minutos e era feito um segundo descarte. Estas rotinas foram avaliadas durante o período entre 27/05 a 11/12/2015.

Na Tabela 4.1 são resumidas as condições e número de descartes realizados.

Tabela 4.1: Condições das diferentes rotinas de descarte testadas durante a fase 2 da etapa 1

Rotina	Condição de descarte	NA no selo hídrico	h2 e h3	P ₃ *	No de descartes
1	0 ≤ h ₁ < 2 cm; f=2dias	15 cm	5 cm	50 mm.c.a + Patm.	10
2	0 ≤ h ₁ < 2 cm; f=5dias	15 cm	5 cm	50 mm.c.a + Patm.	12
3	2 ≤ h ₁ ≤ 5 cm ; f=2dias	17 cm	7 cm	70 mm.c.a + Patm.	9
4	2 ≤ h ₁ ≤ 5 cm; f=5dias	17 cm	7 cm	70 mm.c.a + Patm.	8

Notas: h₁: Altura entre o nível da interface espuma/biogás e a borda da canaleta de descarte.

P₃: Pressão interna do biogás no interior do STf.

f: Frequência de descarte (dias).

4.3.7.1 Índice de descarte

As rotinas de descarte foram avaliadas em relação à eficiência de remoção de espuma e um índice de descarte, calculado a partir do volume de espuma descartado, da frequência de descarte e a vazão de esgoto tratado no reator UASB, conforme equação seguinte.

$$I_{de} = \frac{V_d}{V_e} \times 100 \quad \text{(Equação 4.7)}$$

Na qual:

I_{de}: índice de descarte de espuma (%)

Vd: volume de espuma descartada (m^3)

Ve: volume de esgoto tratado no intervalo entre dois descartes (m^3) = $(Q_e) \times (f)$

f: frequência de descarte (d)

Qe: vazão média de esgoto tratado no reator ($m^3 \cdot d^{-1}$)

4.3.7.2 Influência do lodo na taxa de acumulação de espuma

A fim de determinar a influência da concentração de lodo no reator sobre a taxa de acumulação de espuma, cada descarte de espuma era acompanhado de coleta pontual de lodo a uma altura de 2,5 m (topo do compartimento de digestão).

O lodo foi caracterizado quanto à concentração de ST e STV conforme o método 2540- E e F do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

4.4 Etapa 2: Avaliação do sistema de peneiramento e desidratação de espuma

4.4.1 Aparato experimental

Para a consecução da Etapa 2 do trabalho, o aparato experimental descrito na etapa 1 (reator UASB, peneira estática e tanque de descarte) (item 4.3.1) foi complementado por um sistema de leitos de secagem em escala piloto.

Os leitos de secagem, confeccionados em fibra de vidro em formato cilíndrico, cobertos para proteção de chuva, foram construídos para o desenvolvimento de pesquisas prévias relacionadas com o desaguamento do lodo (BEJAR, 2005; SALES *et al.*, 2009). Esses leitos cumprem recomendações da ABNT-NBR 12209-2011. Na Figura 4.10 são apresentados os leitos de secagem em escala piloto com suas respectivas dimensões.

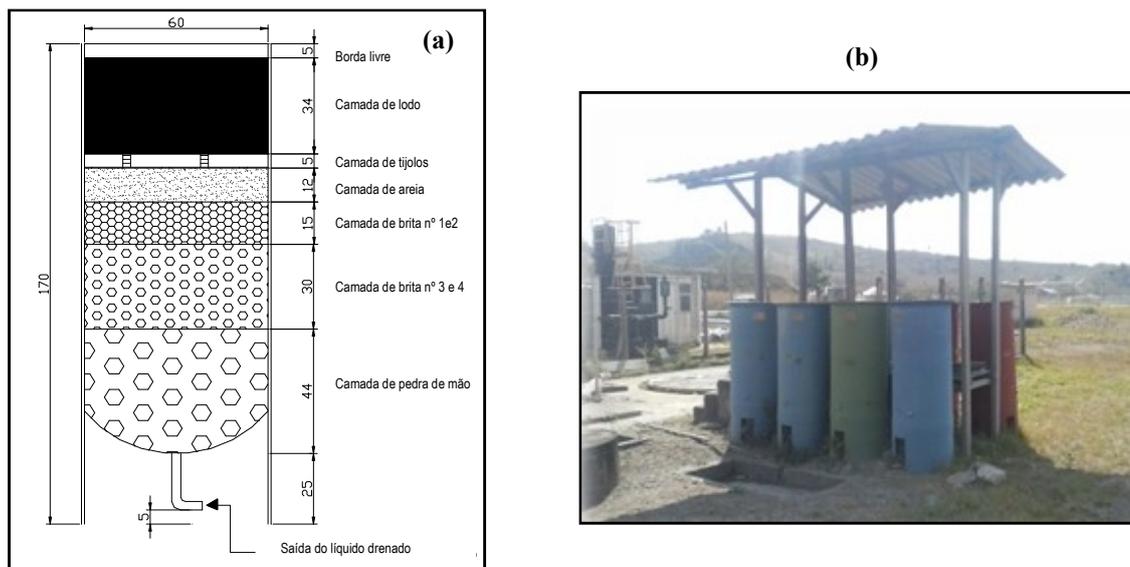


Figura 4.10: Sistema de leitos de secagem em escala piloto: a) Corte esquemático e dimensões; b) Vista dos leitos de secagem instalados sob cobertura de telha de fibrocimento.

Nota: Dimensões do leito em cm (BEJAR, 2005)

4.4.2 Monitoramento dos leitos de secagem

Uma vez realizado cada descarte de espuma, uma fração peneirada desse volume era levada aos leitos de secagem por meio de baldes de 20 L, sendo o máximo volume disposto de 126 L (capacidade máxima de cada leito).

O monitoramento do leito foi realizado mediante a medição do volume da torta no leito, a qual era determinada medindo a profundidade da torta (com uma régua) e multiplicando-a pela área do leito. Ao mesmo tempo era medido o líquido drenado, o qual se coletava em bombonas plásticas que recebiam o drenado por uma mangueira. Foram realizadas medições de volume da torta e do líquido percolado em frequência mínima de 2 vezes por semana.

Além disso, para cada dia de monitoramento, foi determinado o volume de líquido evaporado e a distribuição porcentual de cada parcela, conforme descrito a seguir:

Vd : volume de espuma descartada no leito

Vp-i : volume percolado acumulado dia i

Vev-i: volume evaporado dia i = (volume de descarte - volume percolado acumulado dia i - volume da espuma no leito dia i)

Ves-i: volume de espuma no leito dia i

Assim, as porcentagens de cada parcela após i dias de desidratação são:

$$\% \text{ Escuma dia } i = [(Ves-i) / Vd] \times 100$$

$$\% \text{ Percolado dia } i = [(Vp-i) / Vd] \times 100$$

$$\% \text{ Evaporado dia } i = [(Vev-i) / Vd] \times 100$$

$$100\% = \% \text{ Escuma dia } i + \% \text{ Percolado dia } i + \% \text{ Evaporado dia } i$$

Na Figura 4.11 são apresentadas fotografias do procedimento de preenchimento dos leitos e monitoramento dos volumes da torta do leito e do líquido drenado.

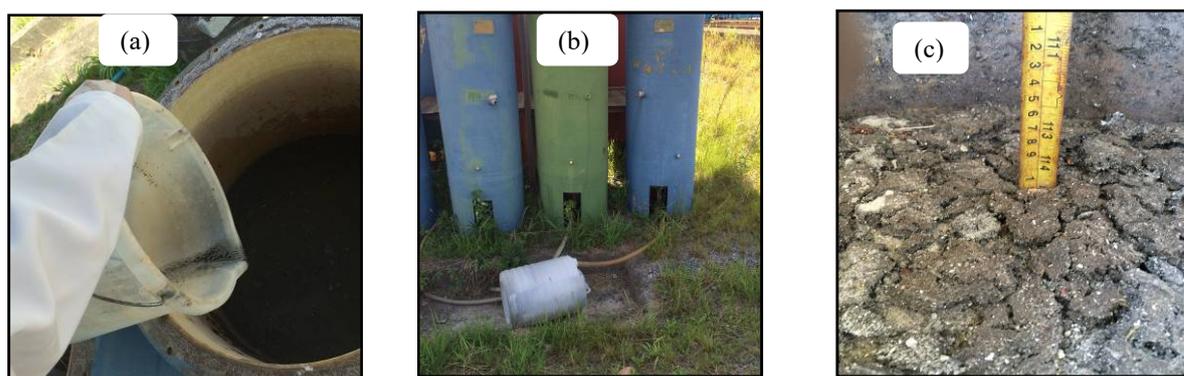


Figura 4.11: (a) Preenchimento dos leitos de secagem. (b) Coleta de percolado. (c) Medição da altura da torta do leito

Em cada dia de monitoramento, era coletada amostra de leito para análise de sólidos totais e voláteis, seguindo o método 2540 G descrito no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). Na Figura 4.12 é apresentado o fluxograma de descarte e desidratação da espuma.

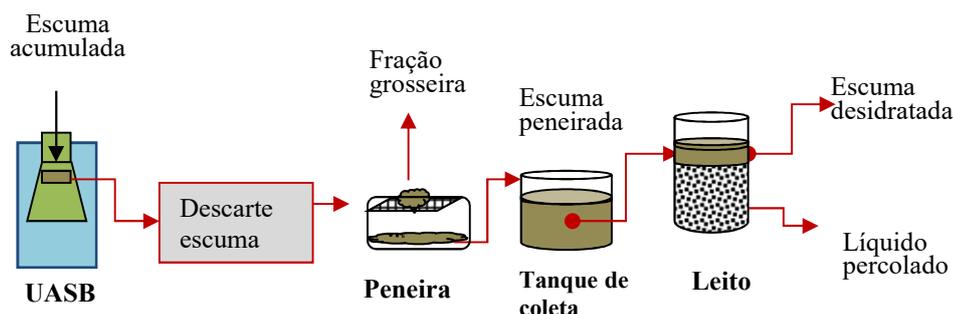


Figura 4.12: Representação da sequência de descarte, peneiramento e desidratação da espuma

4.4.3 Área de leito requerida para o descarte de espuma

A partir do volume de espuma descartada (peneirada) foi calculada a área de leito seguindo as recomendações da ABNT-NBR 12209-2011 referentes à desidratação de lodo e uma adaptação do procedimento proposto por Gonçalves *et al.* (2003), conforme descrito a seguir.

- a) Vazão de espuma a ser desidratada ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$).

$$Q_{\text{esc}} = \text{volume de descarte (m}^3\text{) / intervalo de descarte (d)}.$$

- b) Duração do ciclo de operação do leito de secagem.

$$T = T_S + T_L.$$

Onde:

$$T_S = \text{tempo de secagem (d)}$$

$$T_L = \text{tempo de limpeza de leito (d)}.$$

- c) Volume de espuma desidratada por ciclo do leito de secagem (m^3).

$$V_{\text{esc}} = Q_{\text{esc}} \times T = \text{m}^3/\text{ciclo}.$$

- d) Área necessária para o leito de secagem (m^2).

$$A_{\text{ls}} = V_{\text{esc}} / 0,50^*$$

*Considerando uma altura de espuma no leito de 0,5 m. A norma ABNT-NBR-12209-2011 estabelece que a altura livre das paredes do leito de secagem, acima da camada de areia, deve

ser de 0,5 m a 1,0 m. Além disso, a descarga de lodo no leito de secagem não deve exceder a carga de sólidos em suspensão totais de 15 kg/m² de área de secagem, em cada ciclo de operação.

4.4.4 Balanço de O&G da espuma descartada e desidratada no leito de secagem

O balanço de O&G da espuma descartada foi realizado como a somatória da fração de O&G que ficou retida na peneira, a fração de O&G que ficou na torta do leito de secagem e a fração de O&G que saiu do líquido percolado do leito (Figura 4.12).

A amostragem das frações foi realizada no momento do descarte para a fração grosseira e após 2 dias de desidratação para a torta do leito e o líquido percolado. Para as amostras do leito eram coletados volumes aproximados de 100 mL de diferentes pontos do leito e para as amostras do percolado eram coletados volumes de 1 L a partir da bombona que continha o total de líquido percolado até o segundo dia de desidratação. Os análises de O&G da fração grossira e torta do leito foram realizadas usando o método 5520 E, e para a líquido percolado foi usado o método 5520 D, ambos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

4.5 Etapa 3: Avaliação do sistema de pré-adensamento de espuma

4.5.1 Aparato experimental

Após a realização do descarte, a espuma peneirada e retida no tanque de coleta era misturada e uma alíquota com volume de 60 L era transferida para o tanque de adensamento. Este tanque era circular (35 cm de diâmetro) e capacidade de 100 L. A uma altura de 15 cm do fundo do tanque foi inserido um ponto de coleta da fração clarificada. A espuma flutuante era coletada com um béquer. O tempo de adensamento foi estabelecido em 1 hora.

Na Figura 4.13 é apresentado o fluxograma de descarte e adensamento da espuma.

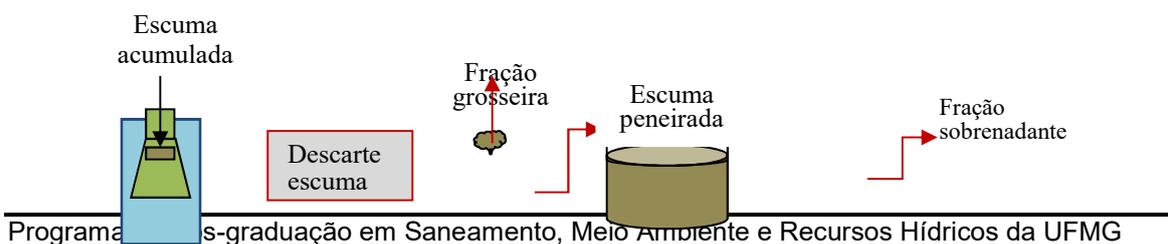




Figura 4.13: Representação da sequência de descarte, peneiramento e adensamento da espuma

A medição de cada fração no tanque de adensamento foi estimada a partir de uma proveta de 1 L. Nesta proveta era disposta uma fração da mesma espuma levada para o tanque de adensamento, e eram medidos, após uma hora, os volumes das três frações. Este resultado permitia conhecer o volume de cada fração por litro de espuma, que era usado para extrapolar as frações com base ao volume disposto no tanque de adensamento. Na

Figura 4.14 são apresentadas fotografias do tanque de adensamento com o ponto de coleta e a proveta para medição das frações de espuma.

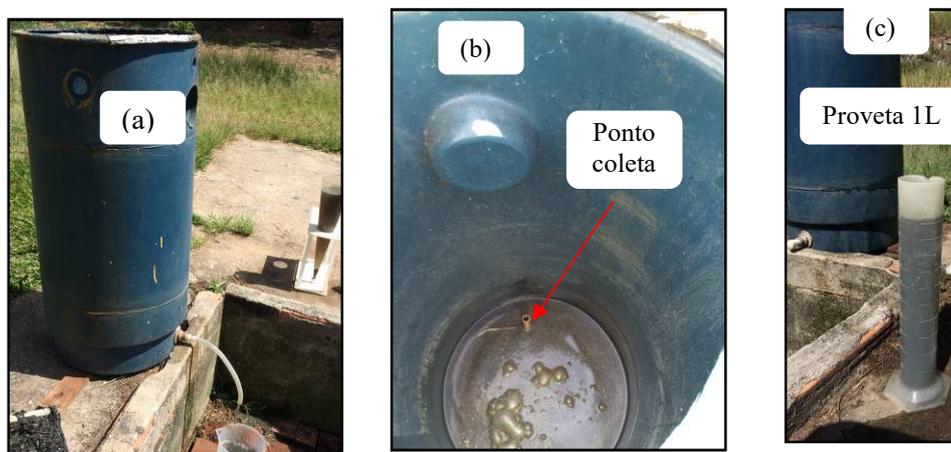


Figura 4.14: (a) Coleta da fração clarificada. (b) Ponto de coleta da fração clarificada a 15 cm do fundo. (c) Proveta a para medição de frações de espuma.

Da fração clarificada foram realizadas análises laboratoriais de DQO, DBO, ST, STV, Sólidos Sedimentáveis e O&G, conforme o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

4.5.2 Biodegradabilidade anaeróbia da fração sobrenadante de espuma adensada

Da fração sobrenadante foram realizados testes de biodegradabilidade anaeróbia a partir do teste *Biochemical Methane Potential (BMP)*, usando o equipamento *Automatic Methane Potential Test System - AMPTS II* (BIOPROCESS CONTROL SWEDEN AB, 2013), para avaliar a potencialidade de produção de metano a partir desta fração da espuma. Esse teste teve por objetivo avaliar o potencial de aproveitamento energético do biogás produzido a partir da fração sobrenadante de espuma, caso a mesma fosse tratada num biodigestor externo ou recirculada de volta ao reator UASB.

O inóculo usado nos testes BMP foi lodo anaeróbio coletado do mesmo reator UASB utilizado na pesquisa. Para a coleta do lodo, foram tomadas frações de 5 litros de pontos de descarte de lodo localizados a 1,0 e 1,5 m desde o fundo do reator, a fim de garantir as recomendações de teor de sólidos voláteis para o teste ($STV/ST > 50\%$). Estas frações foram misturadas e armazenadas em câmara fria (4°C) até o momento da montagem do teste.

A espuma flutuante usada como substrato dos testes foi coletada da parte superficial do tanque de adensamento. Com o auxílio de um béquer, eram realizadas coletas superficiais, lentas, deste material até completar um volume de 1 L de amostra.

Tanto o inóculo quanto as amostras de espuma sobrenadante foram analisados quanto aos seus teores de sólidos totais (ST) e sólidos totais voláteis (STV) seguindo-se a metodologia descrita no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2012), a fim de determinar as proporções necessárias de substrato e inóculo, em cada frasco reator.

A montagem do teste foi realizada em triplicata, usando frascos reatores com inóculo (Lodo UASB) e substrato (espuma sobrenadante), perfazendo volume útil de aproximadamente 400 mL. Além disso, foi montada uma triplicata para controle contendo apenas o inóculo. Para os testes foram propostas duas relações de Substrato/Inóculo ($gSTV_{substrato}/gSTV_{inóculo}$), tendo com critério a recomendação da metodologia que sugere não usar relações acima de 0,5.

Os frascos reatores e frascos controle foram incubados em banho termostático a 35°C, com

tempo de agitação contínua de 30 s e intervalos de descanso de 60 s (Figura 4.15). A finalização de cada teste deu-se no momento que a produção de metano em cada frasco foi inferior a 5 mL CH₄.dia⁻¹.

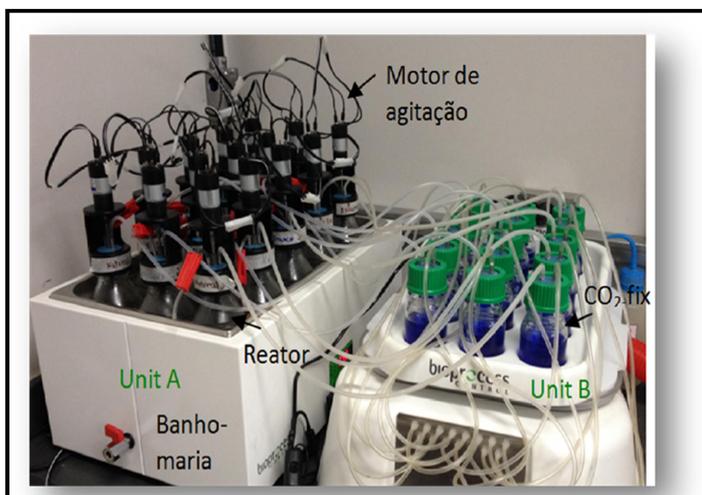


Figura 4.15: Montagem do Teste no equipamento AMPTS II

4.6 Tratamento estatístico de dados

Para o análise estatístico dos dados foram utilizadas ferramentas da estatística descritiva e não paramétrica. Para os dados analisados foram determinados o número de dados, médias aritméticas, medianas, percentis 25 e 75%. Em alguns casos foram utilizados diagramas de “*box-whisker*” e de series temporais. Foram considerados dados “outliers” aqueles que se encontravam fora da faixa definida pela mediana $\pm 1,5*(\text{amplitude interquartil})$.

A fim de verificar a existência de diferença significativa entre os resultados médios obtidos, foram realizados testes não paramétricos de Mann-Whitney e Kruskal-Wallis (OLIVEIRA, 2014). As ferramentas informáticas para os análises estatísticos foram o programa Microsoft Excel 2010 e programa *Statistica* 8,0 (Ver. 2007, StatSoft,Inc).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Etapa 1: Estabelecimento de rotinas de descarte de espuma

5.1.1 Fase exploratória de descarte

Nesta primeira fase exploratória da pesquisa foram realizadas nove rotinas de descartes. Em cada rotina variaram-se as condições operacionais (frequência de descarte, altura da interface espuma/biogás em relação da canaleta (h_1), abertura de válvula e tempo de descarte. Estas condições e os resultados de eficiência de remoção da espuma são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Condições operacionais e eficiências de remoção de espuma durante a etapa exploratória

Descarte	Data	Frequência de descarte (dias)	h_1^{**} (cm)	Abertura válvula (%) e tempo de descarte (s)	Eficiência de Remoção %	Volume de descarte (L)
1	27/02/2015	17	3	$Av_1=100\%$; $t=90s$	95%	791,7
2	18/03/2015	19	5	$Av_1=25\%$; $t=68s$ $Av_2=50\%$; $t=61s$	85%	216,2
3	14/04/2015	4	2	$Av_1=50\%$; $t=34s$	99%	97,9
4	25/04/2015	9	2	$Av_1=100\%$; $t=5s$ $Av_2=50\%$; $t=10s$	100%	24,4
5	28/04/2015	3	1	$Av_1=50\%$; $t=9s$ $Av_2=100\%$; $t=10s$	80%	60,2
6	05/05/2015	7	3	$Av_1=100\%$; $t=5s$ $Av_2=50\%$; $t=20s$	93%	68,8
7	15/05/2015	10	2	$Av_1=100\%$; $t=9s$ $Av_2=50\%$; $t=15s$	99%	107,3
8	20/05/2015	5	2	$Av_1=50\%$; $t=14s$ $Av_2=100\%$; $t=10s$	73%	81,7
9	22/05/2015	2	-2	$Av_1=50\%$; $t=20s$	17%	167,6

Notas: * Av_1 e Av_2 : Grau de abertura de válvula nos descartes 1 e 2, respectivamente. O descarte se fez em duas etapas sob as mesmas condições.

** h_1 : Altura entre interface espuma/biogás e borda da canaleta no momento de descarte. Valor positivo significa que a espuma está abaixo da borda da canaleta e valor negativo que está acima.

Observa-se que as eficiências de remoção de espuma variaram entre 17% e 100%. As rotinas de descarte que iniciaram com abertura de válvula de 100% tiveram melhores eficiências de remoção.

Outros aspectos importantes identificados nesta etapa foram:

- ✓ Quando o nível de espuma fica abaixo da borda da canaleta, foi possível observar a conformação de blocos de espuma cuja densidade aumentava com o tempo de

acumulação. Blocos mais densos apresentavam maior dificuldade de remoção.

- ✓ As duas bordas da canaleta de descarte de espuma apresentavam um desnível de aproximadamente 5 mm, fato que gerava uma menor remoção de espuma num lado da canaleta em relação com o outro lado. Além disso, a canaleta foi projetada com umas asas de fixação das paredes do STf com as faces laterais da canaleta. Nos intermédios destas assas eram formados blocos de espuma de difícil remoção.
- ✓ No decantador do reator UASB, o desnível entre a borda da canaleta de coleta do efluente e a borda da canaleta de descarte de espuma é 2 cm (Figura 5.1-a). Foi observado que o nível de líquido na zona de decantação variava com as vazões de esgoto afluente (a canaleta de coleta de efluente tem vertedouros triangulares, pelo qual a lâmina de água sobre a crista do vertedouro aumenta com a vazão de entrada). Nas medições em campo durante os descartes, o desnível máximo observado entre o efluente e a borda da canaleta de descarte foi de 5 cm (Figura 5.1-b).

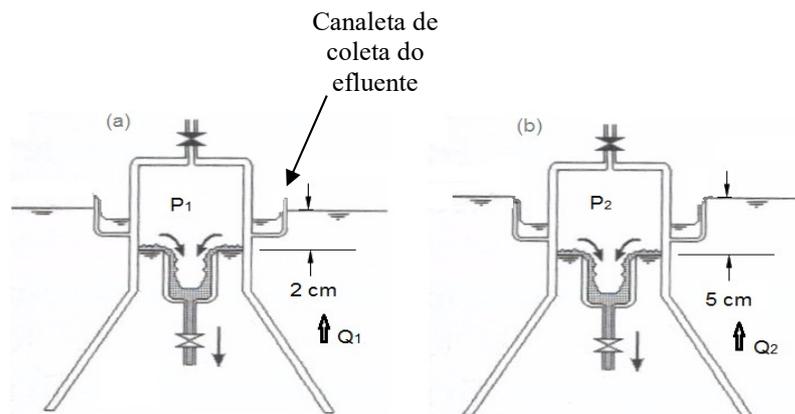


Figura 5.1: Ilustração das variações da altura entre o NA operacional do reator e a borda da canaleta de descarte de espuma: a) $h_1 = 2$ cm para o reator operando com vazão mínima; b) $h_1 = 5$ cm para o reator operando com vazão máxima

Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007).

- ✓ Da figura anterior tem-se que a pressão interna de biogás P_1 ($2 \text{ cm.c.a} + P_{\text{atm}}$) e P_2 ($5 \text{ cm.c.a} + P_{\text{atm}}$) também teve influencia da vazão de esgoto afluente. Dessa forma, possivelmente se tinha efeitos diferentes sobre o escoamento da espuma para o interior da canaleta devido à variação da pressão interna.

- ✓ Devido ao efeito das variações de pressão e com base nas condições do reator se encontrou que para um nível de água no selo hídrico de 15 cm ($h_3 = 5\text{cm}$), a altura h_1 (Ver-Figura 4.4) variava aproximadamente entre 0 e 2 cm (observação visual pelo *Cap* do STf). Com um nível de água no selo hídrico de 17 cm ($h_3 = 7\text{cm}$), a altura h_1 variava aproximadamente entre 2 e 5 cm.

- ✓ Em apenas um dos testes apresentados na tabela 5.1 (teste 9) o nível da interface espuma/biogás ficou acima da borda da canaleta. No entanto, outros testes experimentais (não apresentados) resultaram em elevados volumes de líquido descartado, o que pode ser explicado pelo fato de que todo o volume de líquido situado acima da borda da canaleta tem que sair antes que a espuma possa ser drenada para o interior da canaleta. Além disso, ter um desnível adequado de h_2 (Ver-Figura 4.4) é importante para empurrar o líquido do interior do STf a sair com maior vazão pela canaleta, até alcançar o equilíbrio entre o líquido da zona de decantação e o líquido do interior do STf.

5.1.2 Fase de comparação estatística

5.1.2.1 Avaliação da eficiência de descarte

A determinação das eficiências de descarte de espuma, para as quatro rotinas estudadas, foi realizada avaliando-se os critérios de volumes de descartes e frequências de descarte, como também as porcentagens de remoção de espuma. A melhor eficiência é aquela que resulta em menores volumes de espuma descartados, juntamente com elevadas porcentagens de remoção.

Com base no acima exposto, foram inicialmente determinados os volumes de descarte resultantes para cada rotina operacional testada (Figura 5.2).

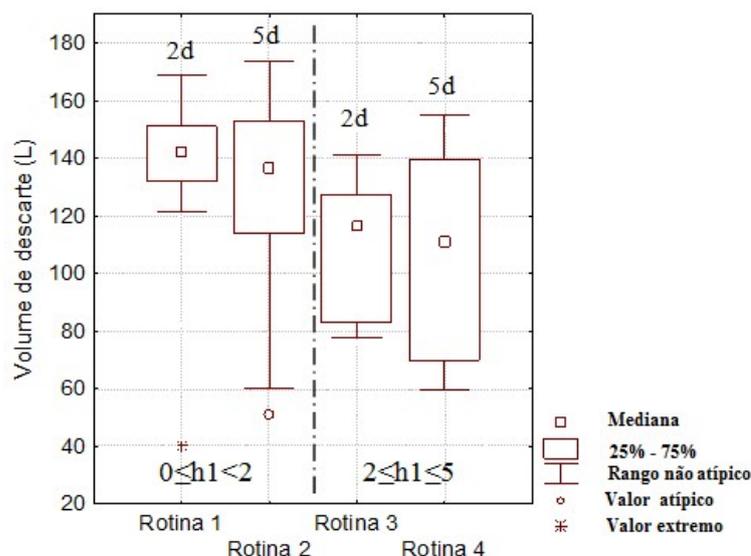


Figura 5.2: Volumes de descarte obtidos em cada rotina de descarte, para cada frequência e nível de espuma h_1

Nota: Rotina 1 ($0 \leq h_1 < 2$ cm; f=2dias), Rotina 2 ($0 \leq h_1 < 2$ cm; f=5dias), Rotina 3 ($2 \leq h_1 \leq 5$ cm; f=2dias); Rotina 4 ($2 \leq h_1 \leq 5$ cm; f=5dias)

A partir dos resultados mostrados na Figura 5.2, foram determinados volumes medianos de descarte iguais a 142,2, 136,5, 116,3 e 109,6 L, respectivamente, para as rotinas 1, 2, 3 e 4. Os menores volumes descartados (Rotinas 3 e Rotina 4) coincidiram com descartes nos quais a espuma esteve entre 2 e 5 cm abaixo da borda da canaleta. Isto indicou que quanto maior o desnível entre a borda da canaleta e a espuma, menor foi o volume de descarte. Esta situação possivelmente se relaciona com uma maior pressão do biogás no interior do separador trifásico nos descartes de maior desnível ($2 \leq h_1 \leq 5$), o que reduz a altura da lâmina líquida sobre a soleira do vertedor, reduzindo a vazão de descarte. Ou seja, o biogás exerce uma pressão contrária sobre a superfície do líquido, que controla sua entrada em grandes volumes pela canaleta.

Os resultados destas quatro rotinas também foram avaliados em relação a eficiência de remoção de espuma, cujas medianas e faixas de variação são apresentadas na Figura 5.3, a seguir. As eficiências medianas de remoção (%) foram de 90,1, 75,6, 85,6 e 87,7, respectivamente, para as rotinas 1, 2, 3 e 4. As diferentes rotinas não apresentaram diferenças significativas quanto às porcentagens de remoção (Kruskal-Wallis: Significância 5%; p -value= 0,5).

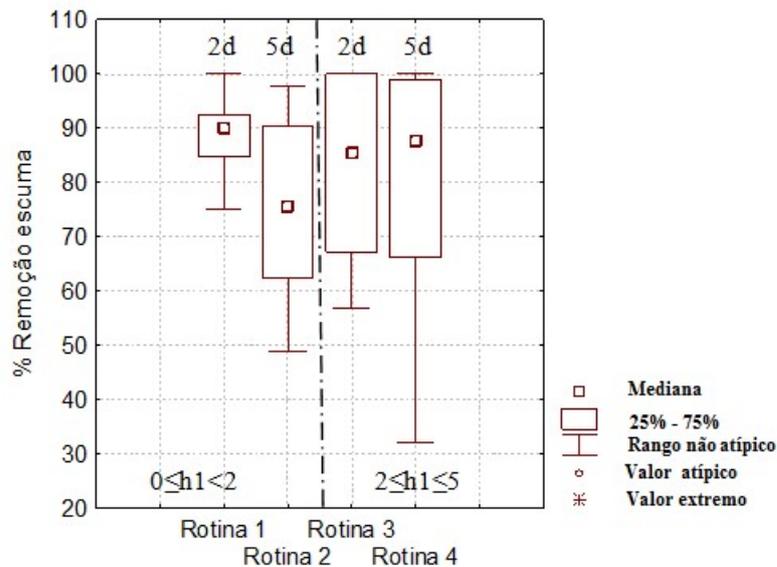


Figura 5.3: Eficiência de remoção de escuma obtidos em cada rotina de descarte, para cada frequência e nível de escuma h_1

Com o objetivo de definir a melhor eficiência de descarte, como também de estabelecer parâmetros comparativos em relação a outros reatores UASB, foi estabelecido um índice denominado “índice de descarte”, que relaciona o volume de escuma descartado (m^3), a frequência de descarte (d) e a vazão de esgoto tratado no reator UASB ($m^3 \cdot d^{-1}$). Este índice, cujo resultado é expresso em porcentagem, indica a quantidade de escuma descartada em relação com a quantidade de esgoto tratado no reator no intervalo entre dois descartes.

Os resultados deste índice de descarte foram de 0,16 % (Rotina 1), 0,06% (Rotina 2), 0,13% (Rotina 3) e 0,05% (Rotina 4). Os melhores índices de descarte foram apresentados com a aplicação das Rotinas 2 e 4. No entanto, foi selecionada a Rotina 4, como a mais eficiente, uma vez que o volume mediano de descarte foi significativamente menor em relação com a Rotina 2 (Mann-Whitney; Significância = 10%).

Isto significa que a Rotina 4, correspondente a uma frequência de descarte de 5 dias e altura de escuma entre 2 e 5 cm abaixo da borda da canaleta, levou a menores volumes de descarte com alta eficiência de remoção de escuma, conseqüentemente, menores custos de gerenciamento deste resíduo após o descarte.

Na Tabela 5.2 são consolidados os resultados de volumes de descarte, eficiências de remoção e os índices de descarte, para as quatro rotinas de descarte estudadas.

Tabela 5.2: Condições operacionais e resultados das diferentes rotinas de descarte testadas

	Rotina 1	Rotina 2	Rotina 3	Rotina 4
Nível de espuma/biogás em relação à borda da canaleta	$0 \leq h_1 < 2$ cm	$0 \leq h_1 < 2$ cm	$2 \leq h_1 \leq 5$ cm	$2 \leq h_1 \leq 5$ cm
Frequência de descarte (d)	2	5	2	5
Vd: Volume de descarte de espuma(L)	142,2	136,5	116,3	109,6
Eficiência de remoção de espuma (%)	90,1	75,6	85,6	87,7
Qe: Qmédia esgoto tratado ($m^3 \cdot d^{-1}$)	45,5	45,5	45,5	45,5
Ve: Volume de esgoto tratado (m^3)	91,0	227,5	91,0	227,5
Índice de descarte (%)	0,16	0,06	0,13	0,05

Nota: Índice de descarte: $Ide = \frac{Vd}{Ve} \times 100$

Em relação aos dados de eficiência de remoção de espuma, para as rotinas 3 e 4, que tiveram o desnível h_1 de 2 a 5 cm, os resultados estão na faixa de variação dos reportados nos estudos da ETE Laboreaux - Itabira (Rosa *et al.*, 2012; Santos, 2014; Rosa *et al.*, 2014), que indicaram eficiências de remoção entre 60 e 100%, para a um desnível h_1 de 3 cm. Uma vez que o volume de descarte não foi reportado nesses estudos, não foi possível comparar com a eficiência do descarte

No caso de uma estação com uma população de 100.000 hab, teoricamente o esgoto tratado seria de $12.500 m^3 \cdot d^{-1}$ (QPC-esgoto= $125 L \cdot hab^{-1} \cdot d^{-1}$). A rotina mais eficiente levaria a um volume de descarte de $31,2 m^3$ a cada 5 dias, enquanto que a menos eficiente a um volume $40 m^3$ a cada 2 dias.

Comparando com os resultados da avaliação de Ross *et al.*(2102) em três das ETEs de Paraná, onde foi reportado um volume de descarte de espuma de 0,12% da vazão de esgoto tratada, se tem que a implementação da rotina 4 nesses sistemas, representaria uma redução acima do 50% no volume de espuma descartada.

5.1.3 Biogás perdido durante a operação de descarte de espuma

Com o objetivo de ter uma estimativa da perda de biogás nos descartes realizados, foi adotado o seguinte procedimento em campo, baseado em medições da produção de biogás (mediante gasômetro) antes do descarte e do tempo para reiniciar a produção de biogás, após o descarte.

A vazão de biogás vezes o tempo de reinício de produção de biogás indicou o volume necessário para voltar a pressurizar o separador trifásico, o que é equivalente ao volume perdido de biogás. Estas medições deram como resultado volumes medianos perdidos de biogás de 12 L e 13,7 L para descartes com frequências de 2 e 5 dias, respectivamente. Ressalta-se que são volumes totais perdidos nas duas etapas de descarte de 10 s.

Os volumes de biogás produzidos no reator UASB foram estimados em 7,8 m³ e 19,6 m³, para períodos de 2 e 5 dias. Estes volumes foram calculados usando o valor de referência de taxa de produção de biogás de 85,6 L_{biogás}·m⁻³_{esgoto} definido por (LOBATO; CHERNICHARO; SOUZA, 2012) e a vazão média de esgoto de 45,5 m³·d⁻¹ tratada no reator.

Os resultados anteriores indicaram que os volumes de biogás perdidos nos descartes de frequências de 2 e 5 dias, representaram, respectivamente, o 0,15% e 0,07% do total de biogás produzido nesses intervalos de tempo.

5.1.4 Volumes e concentrações de sólidos das frações de espuma geradas no descarte

Os resultados de volume das frações de espuma (Espuma peneirada, fração grosseira e espuma retida no separador trifásico) são consolidados na Tabela 5.3. Estes resultados de medianas e percentis foram calculados com o total de dados de todas as rotinas de descarte.

Tabela 5.3: Volumes de cada fração de espuma gerados no descarte

Fração de espuma	Volume (L)	
	Mediana	percentil 25 -75%
Fração peneirada	119,5	95,1-142,2
Fração grosseira	0,85	0,2-1,9
Fração retida no separador trifásico	0,45	0,3-0,9
Total	120,8	95,5-145,0

Nota: número de dados=44.

A partir dos resultados das três frações de espuma geradas no descarte, se teve que o volume de espuma descartado (fração peneirada mais fração grosseira) foi de 99,6% do total gerado, enquanto que apenas 0,4% ficou retida no separador trifásico. A espuma descartada se subdivide em 99,3% (fração peneirada) e 0,7% (fração grosseira).

Na Tabela 5.4, a seguir, são apresentados os resultados das medianas e percentis (25-75%) de

concentração de sólidos totais e voláteis das frações de espuma obtidas nas rotinas de descarte.

Tabela 5.4: Concentrações medianas de sólidos totais e voláteis das frações de espuma

Fração de espuma descartada	n	ST (g.L ⁻¹)	STV (g.L ⁻¹)	STV/ST (%)
Escuma peneirada	40	2,8 (2,2-5,3)	1,9 (1,5-3,5)	67 (64,8-68,5)
Fração grosseira	37	145,8 (109,9-235,6)	120,8 (85,0-220,5)	85,2 (80,8-91,8)
Escuma retida no separador trifásico	32	91,6 (77,9-121,1)	74,6 (64,1-103,0)	85,0 (82,5-87,8)

Nota: n = número de dados

Conforme observado na Tabela 5.4, foram obtidas maiores concentrações de sólidos (ST e STV) nas frações grosseira e retida no separador trifásico, as quais também apresentaram relações STV/ST similares. A menor concentração de ST na espuma peneirada é devida à diluição com o efluente liberado no descarte. Nas observações de campo, a fração grosseira se caracterizou pela presença de cabelo, plásticos e material vegetal como folhas de plantas, enquanto que a espuma peneirada encontrava-se com pouca presença destes resíduos e tinha aparência de lodo do compartimento de digestão.

Os resultados da fração grosseira mostraram-se em consonância com os encontrados nos estudos de Santos (2014) que, utilizando uma peneira com abertura de tela maior (5 mm), reportou concentrações medianas de ST de 151 g.L⁻¹. Ressalta-se que no início do experimento foi testada uma peneira de 5 mm, não obstante, observou-se a passagem de muito material grosseiro até o tanque de coleta da espuma peneirada.

A partir dos dados de volume e concentração de cada fração de espuma, foram calculadas as massas e os percentuais de sólidos totais destas frações (Tabela 5.5). Em termos de massa, a fração grosseira representa aproximadamente 25% da massa de ST gerada no descarte, no entanto, esta fração representa menos de 1% em termos de volume, conforme apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.5: Porcentual em massa de cada fração de espuma gerados no descarte

Fração de espuma	(kg ST)	(% massa ST)
	mediana	mediana
Fração peneirada	0,34	67,0
Fração grosseira	0,12	24,8
Fração retida no separador trifásico	0,041	8,2
Total	0,5	100

De uma maneira geral o dispositivo de peneiramento teve bom funcionamento, embora que com o aumento da concentração de sólidos da espuma descartada a peneira tendia a colmatar-se. Foi também observado que a maior pressão do jato de espuma sobre peneira de abertura mais elevada provocava o arraste de sólidos através das aberturas. Finalmente, pode-se inferir que tanto a concentração de espuma descartada e a forma como escoar a espuma na peneira são fatores que devem ser considerados na seleção da peneira.

5.1.5 Carga de DQO afluente ao reator e taxa acumulação de espuma

A concentração mediana de DQO afluente ao reator UASB durante o período da pesquisa foi de 403,9 mg.L⁻¹, com uma variação entre 263,6 e 530,9 mg.L⁻¹ (percentis 25 – 75%). A carga orgânica mediana de DQO afluente ao reator foi de 18,4 kg.d⁻¹.

A taxa de acumulação mediana de espuma foi de 9,1 gST.kgDQO⁻¹.d⁻¹, com uma variação entre 5,0 e 12,3 gST.kgDQO⁻¹.d⁻¹ (percentis 25 – 75%).

5.1.6 Influência do lodo na acumulação de espuma

A concentração mediana do lodo do compartimento de digestão a uma altura de 2,5 m (topo do compartimento de digestão) foi avaliada em 3,6 g.L⁻¹, com variação entre 0,7 e 22,8 g.L⁻¹ (percentil 25-75%). Quanto à concentração mediana de STV, esta foi de 1,9 g.L⁻¹, com variação entre 0,4 e 15,0 (percentil 25-75%). A relação mediana de STV/ST foi de 64,5% com variação entre 60,0 e 65,5% (percentil 25-75%).

Aplicando o teste de correlação de Spearman entre a concentração de lodo na altura 2,5 m e a taxa de acumulação de espuma no interior do separador trifásico, se teve uma correlação positiva de 0,67 (p<0,05), que indica a importância de se manter um adequado controle e gerenciamento do lodo, a fim de diminuir as taxas de acumulação de espuma. Na Figura 5.4, a

seguir apresenta-se o gráfico de correlação.

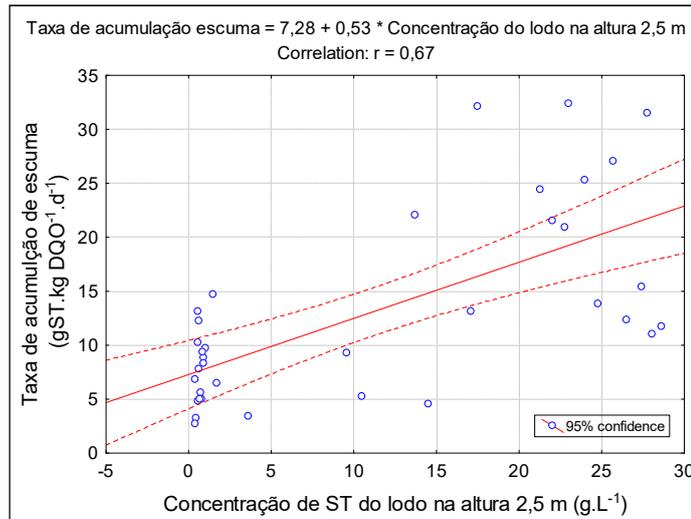


Figura 5.4: Gráfico de correlação entre a concentração de lodo na altura 2,5 m e a taxa de acumulação de espuma

Esta influência também pode ser observada da Figura 5.5, na a qual taxa de acumulação de espuma aumenta ou diminui com a concentração do lodo (altura 2,5 m). A queda significativa na concentração de ST do lodo 2,5 observada após o dia operacional 43 deve-se a um descarte de lodo do compartimento de digestão realizado no dia operacional 28.

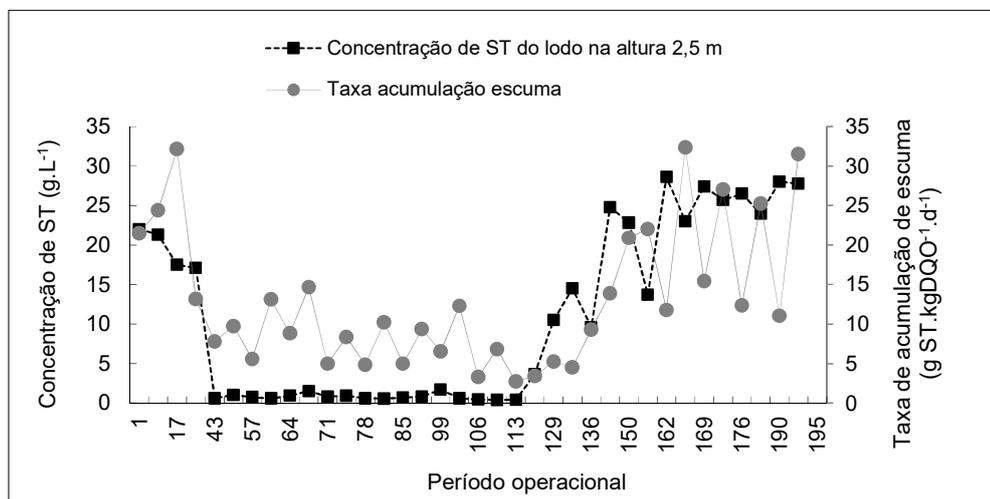


Figura 5.5: Influência da concentração de lodo na altura 2,5 m sobre a taxa de acumulação de espuma

Nota: descarte de lodo no dia 28

Esta correlação encontrada corrobora as observações de outros trabalhos sobre espuma (SOUZA, 2006; RAMOS, 2008; ROSS, 2015).

5.2 Avaliação do sistema de peneiramento e desidratação de espuma

Os testes de desidratação da espuma após passagem pela peneira (fração peneirada) foram realizados para 12 descartes. As concentrações e cargas de espuma aplicadas aos leitos variaram entre 2,7 a 4,3 g.L⁻¹ (percentil 25-75%) e 0,8 a 1,5 kgST.m⁻², respectivamente.

5.2.1 Variação do teor de sólidos totais com o tempo de desidratação

Os resultados obtidos mostraram que, em termos de sólidos totais, a espuma aplicada aos leitos de secagem passou de uma concentração mediana de 0,3% (dia de descarte) para uma concentração de 89,0% após um período de 5 dias de desidratação, conforme mostrado na Figura 5.6. Ademais, encontrou-se que, a partir do dia 2, a espuma já apresentava características que permitiam seu transporte (concentrações de ST acima de 20%).

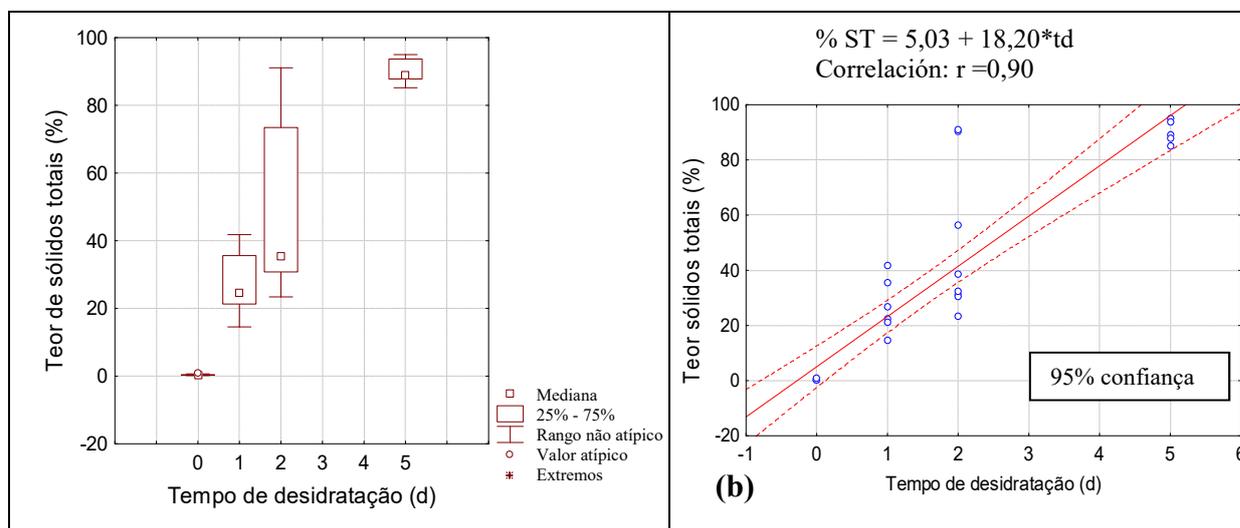


Figura 5.6: Variação do teor de sólidos ao longo do tempo de desidratação. (a) Diagrama de box-plot. (b) Gráfico de dispersão

Nota: não foram obtidos resultados para os dias 3 e 4, uma vez que estes dias coincidiam com finais de semana.

Os resultados obtidos na presente pesquisa mostraram melhor desempenho dos leitos de secagem em comparação com os avaliados por (ROSS *et al.*, 2015), que reportou concentrações de ST de 26,2% e 33,3% ao final do período de desidratação, para os melhores desempenhos dos leitos de secagem das ETEs Vassoural e Menino de Deus, respectivamente. Todavia, ressalta-se nas duas ETEs avaliadas, as taxas de aplicação de espuma nos leitos foram bem mais elevadas (5,6 a 27,2 kg ST.m⁻²) que as do presente estudo (0,8 a 1,5 kgST.m⁻²). A partir dos resultados de todos os testes experimentais, os autores concluíram que valores superiores a 7,8 kgST.m⁻² não são recomendados, por não permitirem um bom

desaguentamento do material. Ademais, a espuma aplicada nos leitos das duas ETEs não tinha passado por uma etapa de peneiramento e o processo de desidratação foi afetado pela ocorrência de chuvas, uma vez que os leitos não eram cobertos.

Considerando a influência da chuva no processo de desidratação, seria recomendável contemplar a instalação de cobertura nos projetos de leitos de secagem de espuma para regiões de alta pluviosidade.

Conforme observado no gráfico de dispersão (Figura 5.6-b), a desidratação no leito de secagem segue um comportamento linear que pode ser explicado pela equação seguinte (nível de confiança 95%; $r=0,90$)

$$ST = 5,03 + 18,20 \times t_d$$

Na qual:

ST: teor de sólidos totais (%)

t_d : tempo de desidratação (d)

Ressalta-se, no entanto, que esta equação só é válida para leitos de secagem com cargas e características similares às do presente estudo.

Na Figura 5.6-a, observa-se que, no dia 2, existe uma variação entre 30 e 91% na concentração de ST. Estes resultados mostraram-se em concordância com os de Santos (2014), que encontrou, após 60 horas de desidratação, uma concentração de ST igual a 79,9 % para a espuma descartada do interior de STf, após passagem por uma etapa de peneiramento.

Estas boas eficiências, de ambos os estudos, possivelmente foram propiciadas pela retirada da fração grosseira mediante a utilização da peneira. No entanto, esta hipótese não pode ser verificada já que não foram realizados estudos comparativos da desidratação de espuma após um processo de peneiramento com aquela disposta diretamente no leito de secagem.

Para cada teste realizado, foram também avaliadas as variações da relação STV/ST ao longo do período de desidratação, encontrando-se relações medianas de 68% (dia 0), 56% (dia 1),

57% (dia 2) e 53% (dia 5). Ressalta-se que a espuma depositada no leito (dia 0) teve uma variação da relação STV/ST entre 66-69% (percentil 25-75%), podendo-se afirmar que a fração peneirada da espuma encontrava-se parcialmente estabilizada, passível, portanto, de ser enviada para o leito de secagem sem a necessidade de uma etapa prévia de estabilização. Isto indica que a etapa de peneiramento é importante para diminuir as quantidades de materiais orgânicos que chegam ao leito de secagem.

No entanto, a redução de 15% na porcentagem de matéria orgânica durante o período de desidratação é indicativa da ocorrência de processos de degradação no leito ou perdas de compostos orgânicos no percolado do leito. Este efeito da degradação foi observado também por (ROSS *et al.*, 2015), que encontraram diminuições das relações STV/ST ao longo do período de desidratação das espumas da ETE Vassoural (redução de 80 até 50%) e da ETE Menino Deus (redução de 67 até 65%).

5.2.2 Variação do volume no leito com o tempo de desidratação

A variação das medianas dos volumes de espuma nos leitos de secagem, ao longo do período de desidratação, para os 12 descartes realizados, é apresentada na Figura 5.7. Os resultados indicaram que já no primeiro dia de desidratação 94,0% do volume foi drenado pelo leito de secagem e 1,8% foi evaporado, restando um volume remanescente de espuma de apenas 4,2% no leito. No segundo dia de desidratação, o volume percolado representou um 0,8% do total de volume depositado no leito, e no terceiro dia não foi observada mais percolação. Os volumes medianos finais encontrados no quinto dia de desidratação foram de 1,2% para a espuma no leito, 94,8% de líquido drenado e 4,0% de líquido evaporado. Esses resultados demonstram a excelente aptidão da espuma peneirada ao mecanismo de perda de umidade por drenagem da fração líquida presente na espuma.

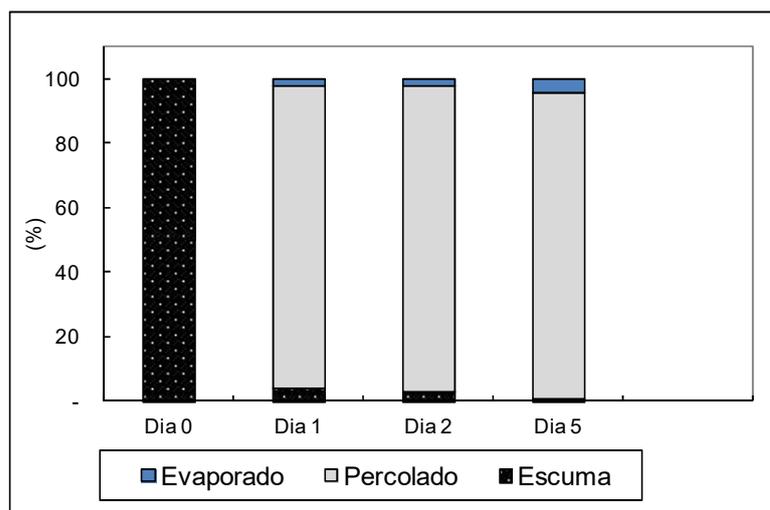


Figura 5.7: Variação das relações de volume de espuma no leito

Com base nas observações em campo, foi generalizada a ausência de odores degradáveis e vetores, como moscas, associadas com a decomposição da matéria orgânica.

5.2.3 Área de leito requerida para a desidratação de espuma do interior do STf

A partir dos resultados de desidratação da espuma peneirada e nas recomendações da norma NBR 12209/2011, foram calculadas as áreas requeridas de leito de secagem para melhor rotina de descarte (Rotina 4 - Item 5.1.2.1). Conforme descrito no procedimento a seguir:

a) Quantidade de espuma a ser desidratada.

$$-Q_e = V_d/t$$

Equação 5.1

Na qual:

Q_e = Quantidade de espuma a ser desidratada ($m^3 \cdot d^{-1}$)

V_d = volume de descarte (m^3). Este corresponde à mediana dos volumes descartados na Rotina 4.

t : intervalo de descarte (d)

$$-Q_e = 0,11 \text{ m}^3 / 5 \text{ d}$$

$$-Q_e = 0,022 \text{ m}^3 \cdot d^{-1}$$

b) Duração do ciclo de operação do leito de secagem.

$$-T = T_S + T_L$$

Equação 5.2

$$-T = 5d.\text{ciclo}^{-1} + 5d \text{ ciclo}^{-1} = 10 d.\text{ciclo}^{-1}$$

Na qual:

T= duração do ciclo de operação (d. ciclo⁻¹)

T_S = tempo de secagem num ciclo de operação de leito (d.ciclo⁻¹). Estimado com base no teste de desidratação da espuma.

T_L= tempo de limpeza de leito num ciclo de operação de leito (d.ciclo⁻¹).

c) Volume de espuma desidratada por ciclo.

$$-V_e = Q_e \times T$$

Equação 5.3

Na qual:

V_e= Volume de espuma desidratada por ciclo (m³.ciclo⁻¹).

$$V_e = 0,022 (\text{m}^3.\text{d}^{-1}) \times 10 d.\text{ciclo}^{-1} = 0,22 \text{ m}^3.\text{ciclo}^{-1}$$

d) Área necessária ao leito de secagem.

$$-A_{LS} = V_e/h_L$$

Equação 5.4

Na qual:

A_{LS} = área necessária ao leito de secagem (m²).

h_L= altura para a borda livre no leito de secagem (m)

$$A_{LS} = 0,22 \text{ m}^3.\text{ciclo}^{-1} / 0,5 \text{ m} = 0,44 \text{ m}^2.\text{ciclo}^{-1}$$

e) Taxa de aplicação de sólidos.

$$-T_{AS} = \frac{STe \times Ve}{A_{LS}}$$

Equação 5.5

Na qual:

STe = Teor sólidos totais escuma descartada (kg ST/m³)

$$-T_{AS} = \frac{3,1\text{kgST.m}^3 \times 0,22\text{m}^3}{0,44\text{m}^2}$$

$$-T_{AS} = 1,6 \text{ kg ST.m}^{-2}$$

Este valor cumpre com as exigências da norma ABNT-NBR 12209-1992 para leitos de secagem de lodo (taxa máxima de 15 kg ST/m²).

Considerando que o reator em estudo atende uma população de 380 habitantes, a área per capita requerida é:

$$\text{Área per capita} = \begin{cases} 0,44 \text{ (m}^2\text{)} / 380 \text{ hab.} = 1,16 \text{ m}^2 / 1.000 \text{ hab.} \\ \text{Ou } 1000 \text{ hab.} / 1,16 \text{ m}^2 = 862 \text{ hab/m}^2 \end{cases}$$

Tendo como exemplo uma cidade média brasileira de 100.000 habitantes usando reatores UASB, ter-se-ia que a área necessária de leito de secagem de escuma seria de 116 m². Este valor é para a escuma do interior do separador trifásico, considerando um descarte com remoção hidrostática para as condições da Rotina 4.

Esta mesma população precisaria de uma área para a desidratação de lodo em leitos de secagem da ordem de 2.200 m² (considerando produção mássica per capita de lodo de 15 g. hab⁻¹.d⁻¹, tempo de secagem 15 dias e tempo de limpeza de 5 dias) de acordo com Gonçalves *et al.* (2003). Pelo anterior, se tem que a área necessária para a desidratação de escuma de uma ETE representa aproximadamente 5,3 % da área requerida para a desidratação de lodo, considerando-se leitos de secagem.

Supondo que a vazão média para população de 100.000 habitantes é de 12.500 m³.d⁻¹ (per capita de esgoto: 125 L.hab⁻¹.d⁻¹), e usando os critérios de projeto para o reator UASB (TDH de 8 horas e altura 4,5 m), se tem que o volume e área de reatores UASB necessários para

atender esta população são respectivamente 4.166,6 m³ e 925,9 m². (CHERNICHARO, 2007).

Com base no anterior, a área necessária para leitos de secagem de espuma representa o 12,5% da área de projeto para os reatores UASB. Este valor é muito baixo considerando que a área para leitos de secagem de lodo é de aproximadamente 2,4 vezes a área dos reatores UASB.

5.2.4 Balanço de O&G no processo de descarte e desidratação da espuma

Na Tabela 5.6 são apresentados os resultados do teor de O&G das três frações de espuma geradas no processo de descarte e desidratação.

Tabela 5.6: Teor de O&G das frações de espuma no descarte e desidratação

Fração	Unidade	Mediana	Mín.	Máx.
Fração grosseira	g.kg ⁻¹	32,0	32,0	74,8
Escuma leito	g.kg ⁻¹	128,9	47,6	150,8
Percolado	g.L ⁻¹	0,015	0,005	0,021

As concentrações medianas de O&G da espuma desidratada no leito e percolada, se encontram dentro da faixa reportada nos estudos de Santos (2014) para um sistema de descarte com peneiramento e desidratação em leitos de secagem. Quanto à fração grosseira, sua concentração se mostrou aproximadamente 4 vezes menor. Possivelmente diferenças no sistema de peneiramento e nas características da espuma descartada, puderam ter influenciado nestas diferenças. Ressaltasse a boa capacidade do leito de secagem para reter os O&G presentes na espuma descartada.

Para a determinação do balanço de massa de O&G no processo de descarte e desidratação foram realizados dois testes. Em cada teste foram calculadas as massas de O&G contidas em cada fração a partir dos volumes e concentrações em cada uma delas.

As porcentagens de O&G de cada fração em relação com o total de O&G gerados no descarte são apresentadas na Figura 5.8. A partir da média calculada nos dois testes, se tem que para um descarte de espuma realizado com sistema de peneiramento e desidratação, do total de O&G provenientes nesta espuma descartada o 27,6% fica na peneira, o 71,4% fica no leito e 1% fica no percolado.

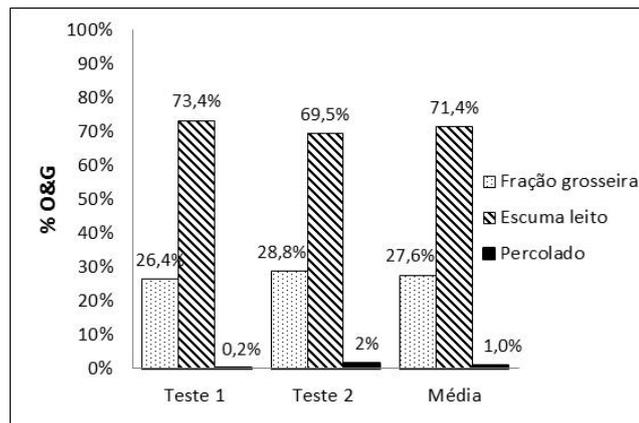


Figura 5.8: Porcentagem de O&G em cada fração de espuma

Para um melhor entendimento se apresenta o seguinte fluxo de O&G para o sistema de peneiramento e desidratação, supondo um descarte de espuma de 1 m^3 (Figura 5.9).

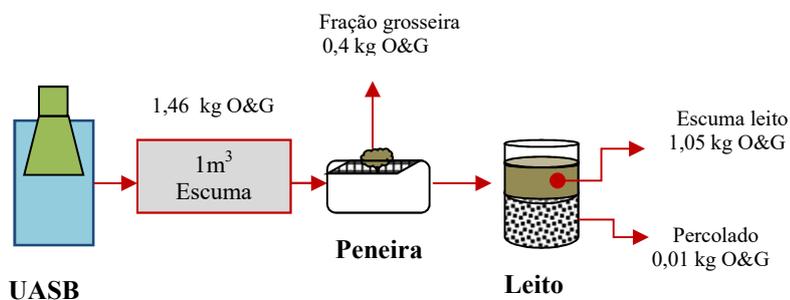


Figura 5.9: Balanço de O&G nas etapas de peneiramento e desidratação da espuma

Nota: Os valores correspondem as medianas dos volumes

De acordo com o balanço de massa realizado se teve que para 1 m^3 a massa de O&G foi de 1,46 kg, que resulta numa concentração de $1,46 \text{ kg.m}^{-3}$ da espuma descartada. Esta concentração média de O&G é aproximadamente 3 vezes maior da encontrada por Santos (2014), que reportou uma concentração de $0,5 \text{ kg.m}^{-3}$ na espuma peneirada aflrente aos leitos de secagem. Possivelmente, a menor concentração de O&G nesse estudo tinha sido ocasionada como os maiores volumes de efluentes liberado no descarte. Todavia, estas concentrações de O&G da espuma descartada de reator UASB são baixas em comparação com as espuma de caixas de gorduras de indústria de alimentos (868 kg.m^{-3}), de um restaurante universitário (621 kg.m^{-3}) e de ETEs (32 kg.m^{-3}) (PINTO *et al.*, 2014).

Considerando que para uma cidade de 100.000 habitantes é gerado um volume de $6,24 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$ (item 5.1.2.1), se teria um potencial de recuperação de O&G a partir da espuma desidratada no leito de secagem de $6,5 \text{ kg.d}^{-1}$ ou 195 kg.mês^{-1} . Mais estudos teriam que ser realizados para se avaliar com maior exatidão as quantidades e características físico-químicas dos O&G

produzidos, bem como a viabilidade de aproveitamento dessa matéria prima para diferentes fins (fabricação de sabão, aproveitamento energético etc.), visando agregar mais elementos para a sustentabilidade econômica e ambiental das estações de tratamento de esgoto.

5.3 Avaliação do sistema de pré-adensamento da espuma

Nesta etapa de adensamento de espuma foram realizados 17 testes. Para cada teste se manteve o mesmo volume de 60L de espuma peneirada como afluente do tanque de adensamento.

5.3.1 Volumes de cada fração gerada na etapa de adensamento de espuma

Após uma hora de adensamento os volumes de cada fração estiveram entre 83 e 93% (percentil 25-75%) para a fração clarificada, entre 3,0 e 6,4% (percentil 25-75%) para a fração sobrenadante e entre 1,3 e 13,0% (percentil 25-75%) para a fração sedimentada. Na Figura 5.10 encontram-se representadas as medianas das porcentagens em volume de cada fração do processo de adensamento.

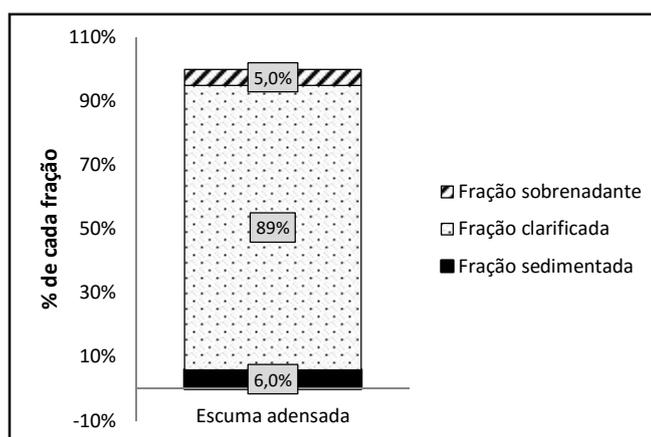


Figura 5.10: Porcentagens de volume de cada fração gerada no adensamento da espuma

5.3.2 Caracterização da fração clarificada de espuma no processo de adensamento

Os resultados da caracterização físico-química da fração clarificada e das concentrações de referência para o esgoto sanitário são resumidos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Caracterização físico-química da fração de espuma clarificada e comparação com valores de esgoto sanitário da literatura

Parâmetro	n	Mediana (P.25-75%)	*Valores ou faixas típicas	Referência
ST (mg.L ⁻¹)	14	487,5 (439,0 - 607,5)	(700 - 1350)	[1]
STV (mg.L ⁻¹)	14	201,0 (152,5 - 330,0)	(240 - 700)	[1]
DQO (mg.L ⁻¹)	17	313,9 (123,0 - 966,0)	(450 - 800)	[1]
DBO (mg.L ⁻¹)	11	125,6 (88,5 - 175,7)	(250 - 400)	[1]
O&G (mg.L ⁻¹)	17	60,7 (35,5 - 71,2)	50-100	[2]
STV/ST (mg.L ⁻¹)	14	41% (35% - 54%)	56,3%	[1]
DQO/DBO	10	2,0 (0,8 - 8,8)	1,7-2,4	[1]

Nota: *Medias ou faixas típicas para esgoto sanitário reportados na literatura. ^[1](VON SPERLING, 2014).
^[2](TCHOBANOGLOUS; BURTON; STENSEL, 2003).

Observa-se da tabela anterior uma ampla variação das concentrações dos parâmetros físico-químicos analisados da espuma clarificada. Estas variações foram possivelmente influenciadas pelas variações nas eficiências de descarte, que a sua vez fizeram que chegasse ao tanque de adensamento espuma mais ou menos concentrada.

De outra parte, as concentrações medianas dos parâmetros analisados para a fração clarificada se encontram abaixo ou na faixa de concentrações típicas para esgoto sanitário. Ressalta-se que esta fração tem uma relação STV/ST baixa em comparação com o esgoto sanitário, que pode estar associada com a presença de matérias coloidais de difícil sedimentação ou flotação como também de minerais dissolvidos.

Quanto a relação DQO/DBO se teve uma mediana que indica uma fração biodegradável elevada, recomendada para o tratamento biológico (DQO/DBO < 2,5) (VON SPERLING, 2014). A pesar que a alta variabilidade inclua relações acima de 4,0 que sugerem um tratamento físico-químico, o impacto da recirculação desta fração clarificada seria pouco significativo considerando os baixos volumes de recirculação em comparação com o esgoto afluente.

É de destacar a efetividade do processo de adensamento para a remoção do teor de O&G da fração clarificada e sua concentração na fração sobrenadante. Isto foi confirmado com análise de O&G da fração sobrenadante, que indicaram uma variação do teor de O&G entre 3,2 e 4,6 g.L⁻¹. Estes teores de O&G da espuma sobrenadante mostraram-se superiores aos reportados por Santos (2014), que encontrou na espuma bruta concentrações médias de O&G de 1,04

g.L⁻¹.

Considerando a concentração média de O&G da fração sobrenadante de 3,7 g.L⁻¹ O&G, num ano de operação do adensador se produziria uma massa de O&G de 1,5 kg (para o reator de 380 hab.). Numa população de 100.000 hab, se teria uma produção de 395 kg.ano⁻¹ de O&G que poderiam ser atrativos para diferentes fins. Além disso, trata-se de uma matéria prima disponível a baixo custo. Ressalta-se que este valor recuperado do processo de adensamento poderia ser substancialmente incrementado com a recuperação dos O&G da fração sedimentada.

5.3.3 Potencial de produção de metano a partir da fração sobrenadante de espuma adensada

Nesta etapa foram realizados dois testes de Potencial de Produção de Metano (BMP) utilizando-se a fração sobrenadante da espuma, gerada no processo de adensamento, como substrato e o lodo do reator UASB como inóculo. Os resultados dos teores de ST e STV do substrato e do inóculo utilizados nos testes são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Caracterização dos substratos e do inóculo utilizados nos testes BMP

Teste	Amostra	ST (g.L ⁻¹)	STV (g.L ⁻¹)	% STV/ST
1	Escuma: fração sobrenadante	18,5	14,7	79,6
	Inóculo: Lodo UASB	29,0	18,5	64,0
2	Escuma: fração sobrenadante	32,3	21,4	66,4
	Inóculo: Lodo UASB	29,0	18,5	64,0
Mediana	Escuma: fração sobrenadante	25,4	18,0	73
	Inóculo: Lodo UASB	29,0	18,5	64,0

5.3.3.1 Montagem dos testes e rendimento de metano a partir da fração sobrenadante da espuma adensada

Na Tabela 5.9, seguinte, são apresentadas as condições utilizadas para os dois testes realizados.

Tabela 5.9: Condições da montagem dos testes AMPTS II

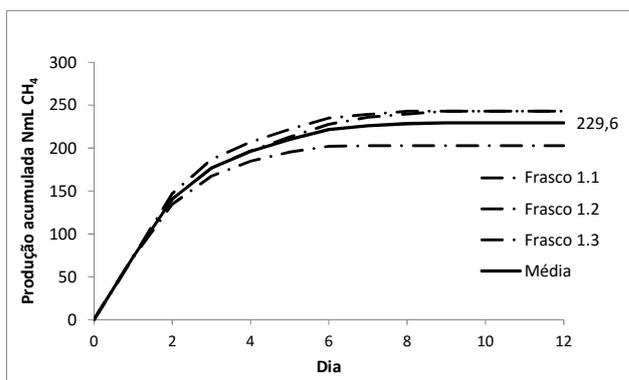
Teste	Relação (S/I)	Massa substrato (gSTV)	Massa inóculo (gSTV)	Massa total (gSTV)	Volume inóculo (mL)	Volume substrato (mL)
1	0,26	1,47	5,56	7,03	300	100
2	0,40	2,20	5,56	7,77	300	150

Nota: Relação (S/I) = $(\text{gSTV}_{\text{substrato}}/\text{gSTV}_{\text{inóculo}})$

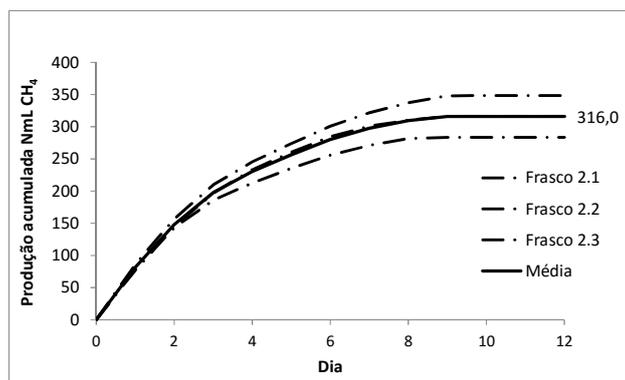
Na Nota: Relação (S/I) = $(\text{gSTV}_{\text{substrato}}/\text{gSTV}_{\text{inóculo}})$

Figura 5.11, a seguir, são apresentadas as curvas de volume acumulado de metano em mL CH₄ (mililitros a 0 °C e 1 atm) diferenciadas para cada teste. Cada gráfico contém os resultados de cada uma das triplicatas e o resultado médio acumulado. Estes são valores efetivos, nos quais já foram descontados os volumes de CH₄ produzidos pela biodegradação do próprio inóculo (frasco controle, contendo apenas lodo de reator UASB).

A duração dos testes foi de 12 dias. O pH dos frascos branco (lodo) e de lodo com espuma, oscilaram na faixa de 7,0 a 7,6, tanto para o início como para o final do teste.



Teste 1 (Escuma sobrenadante com relação S/I=0,26)



Teste 2 (Escuma sobrenadante com relação S/I=0,4)

Nota: Relação (S/I) = $(\text{gSTV}_{\text{substrato}}/\text{gSTV}_{\text{inóculo}})$

Figura 5.11: Produção cumulativa de metano a partir da fração sobrenadante da espuma adensada

Os valores médios de rendimento de metano ($\text{mLCH}_4.\text{gSTV}_{\text{substrato}}^{-1}$) para os testes 1 e 2, foram, respectivamente, de 156,3 e 143,4 (Tabela 5.10).

Tabela 5.10: Rendimentos médios de metano a partir da fração sobrenadante da espuma adensada

Substrato	Volume produzido (mL CH ₄)	Massa de substrato (g STV)	Rendimento (NmLCH ₄ .g STV ⁻¹)
Teste 1 (Escuma sobrenadante com relação S/I=0,26)	229,6	1,47	156,3
Teste 2 (Escuma sobrenadante com relação S/I=0,40)	316,0	2,20	143,4

Notas: mL CH₄ (mililitros a 0 °C e 1 atm)

Relação (S/I) = (gSTV_{substrato}/gSTV_{inóculo})

Os resultados de rendimento de metano para os testes 1 e 2 foram mais baixos que os obtidos por Santos (2014) em testes de biodegradabilidade anaeróbia da espuma do interior do separador trifásico (bruta), a qual apresentou um rendimento entre 464 a 550 mLCH₄.gSTV⁻¹. Este menor rendimento de metano pode estar associado ao maior teor de O&G presente na fração sobrenadante analisada no presente estudo, em comparação com a espuma bruta, uma vez que os O&G se caracterizam por um processo de hidrólise lenta. Além disso, pode ser que a biomassa não se adaptou a degradar um substrato com teores mais altos de O&G (PASSEGGI; LÓPEZ; BORZACCONI, 2009).

Na literatura tem sido reportada a inibição das baterias acetoclásticas e metanogênicas em biodigestores tratando esgoto com altos conteúdos de lipídeos (LONG *et al.*, 2012). De acordo com Rinzema *et al.* (1981) existe um limite letal de concentração de ácidos graxos de cadeia longa (LCFA) para o lodo granular metanogênico. No máximo, 0,2 % dos microrganismos metanogênicos acetotróficos sobrevivem quando a concentração num digestor metanogênico excede este limite letal. Ressalta-se que os ácidos graxos de cadeia longa são derivados de óleos e gorduras e tem no mínimo 8 carbonos (CHERNICHARO, 2007).

Quanto as taxas diárias acumuladas de produção de metano nos testes realizados, encontrou-se que nos primeiros 5 dias foram produzidas 91 e 81% do volume total de metano, respectivamente para os testes I e II. Estes resultados diferem um pouco dos encontrados por Souza (2006), avaliando espuma da zona de decantação para a qual a biodegradação nos primeiros 5 dias foi apenas de 1/4 da degradação alcançada até o dia 20. Possivelmente, o fato

que a espuma avaliada na presente pesquisa tenha passado por etapas de peneiramento e adensamento, resultou em melhoria de suas características de biodegradação no curto prazo, em comparação com a espuma avaliada por Souza (2006), que não passou por estas etapas.

O rendimento de metano da espuma, após as etapas de peneiramento e adensamento, apresentou-se inferior a outros substratos reportados na literatura, tais como celulose (340 mLCH₄.gSTV⁻¹), resíduo alimentar (234 a 496 mLCH₄.gSTV⁻¹), esterco bovino (250 mLCH₄.gSTV⁻¹), lodo ETE (247-300 mLCH₄.gSTV⁻¹). (RAPOSO *et al.*, 2011; FERREIRA, 2015; FNR, 2010).

5.3.3.2 Comparação do metano da biodegradação da espuma em relação com metano do reator UASB

A

Tabela 11 apresenta os cálculos de produção de biogás numa ETE no caso de implantar como alternativa de tratamento um biodigestor para tratar a fração sobrenadante da espuma descartada do interior do STf e que foi submetida as etapas de peneiramento e adensamento.

Tabela 11: Avaliação da alternativa de biometanização da fração flutuante da espuma.

Item	Valor médio	Observação
Volume de espuma descartada e peneirada (5 dias).	0,11 m ³	Aplicando Rotina 4(frequência de descarte 5d).
Volume sobrenadante (5 dias).	0,0055 m ³	A fração sobrenadante representa o 5% do total adensado.
Massa de STV da fração sobrenadante (5 dias).	80,8 g STV	Teor de STV da fração sobrenadante é de 14,7 gSTV.L ⁻¹ .
Volume de metano produzido biodigestor de espuma (5 dias).	0,013 m ³	*Aplicando o rendimento de 156NmLCH ₄ .gSTV ⁻¹
Metano produzido no reator UASB (5 dias).	14,6 m ³	**64,2 NLCH ₄ .m ⁻³ _{esgoto}
Incremento de metano na ETE	0,1%	-

Notas: **Usando o resultado do teste I deste estudo. **Fator calculado por Lobato *et al.* (2012).

Com base nos resultados anteriores, se teve que a alternativa de um biodigestor de espuma não representa ganhos energéticos importantes. No entanto, este aspecto é positivo no sentido de evitar liberação de metano na atmosfera no processo de degradação em leito de secagem ou aterro sanitário.

5.3.4 Fluxograma de descarte de espuma com etapa de adensamento e desidratação em leitos de secagem

Dado que o volume de fração clarificada de espuma a recircular durante um descarte com a

Rotina 4 é de 97,5 L a cada 5 dias, se tem que os incremento na vazão média diária afluyente seria de 0,043%. Este valor seria desprezível considerando que a vazão na ETE varia entre Q_{med} e $1,8xQ_{media}$ (VON SPERLING, 2014). Quanto ao incremento de carga para os parâmetros analisados, estas também seriam insignificantes, considerando que as concentrações da fração clarificada se encontram na faixa típica de esgoto sanitário.

Supondo que a inclusão de uma etapa de adensamento leve à recirculação da fração clarificada ter-se-ia que formular alternativas de tratamento das frações sólidas de espuma geradas na etapa de peneiramento (fração grosseira) e na etapa de adensamento (fração sobrenadante e fração sedimentada), as quais seguramente vão depender do tamanho da ETE.

Na Figura 5.12 é apresentado um esquema de uma ETE (100.000 hab.) com reator UASB com o fluxograma representado possíveis alternativas de gerenciamento da espuma usando o mecanismo de descarte hidrostático, com etapas de peneiramento, adensamento e desidratação em leitos de secagem. Além disso, foram calculadas as quantidades das frações (sólidas e líquidas geradas) a partir dos resultados encontrados neste estudo. Não foi considerada a alternativa de um biodigestor para a fração flutuante devido aos resultados de baixa produção de metano desta fração encontrados no item anterior.

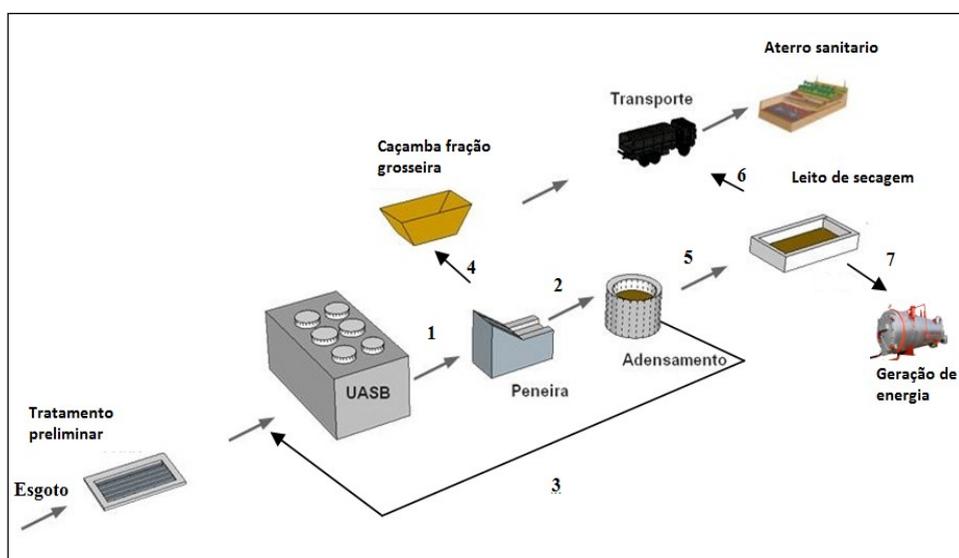


Figura 5.12: Fluxograma de descarte de espuma com adensamento proposto para uma ETE projetada para população de 100.000 habitantes.

Notas: 1: Espuma descartada. 2: Espuma peneirada. 3: Fração clarificada recirculada. 4: Fração grosseira. 5: Fração sobrenadante e sedimentada. 6: Espuma desidratada para aterro sanitário. 7: Espuma desidratada para aproveitamento energético.

A seguir são apresentados os cálculos de quantidades de espuma gerenciadas, com base numa estação de médio porte (população de 100.000 hab), realizando o descarte com a Rotina 4, de frequência de descarte 5 dias (Item 5.1.2.1). Consequentemente, os volumes das frações de espuma geradas em cada etapa, são a cada 5 dias.

Esgoto afluente: $12.500 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. (per capita de esgoto: $125 \text{ L} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)

Escuma descartada: $6,25 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. Para índice de descarte $I_d=0,05\%$.(Item 5.1.2.1).

Escuma peneirada: $6,21 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. Da espuma descartada o 99,3% passa pela peneira. (Item 5.1.4).

Fração clarificada recirculada: $5,53 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. Após 1 hora de adensamento a fração clarificada é 89% da espuma peneirada que foi enviada para a etapa de adensamento. (Item 5.3.1)

Fração grosseira: $0,044 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. A fração grosseira representa 0,7% da espuma descartada. (Item 5.1.4). No fluxograma proposto, esta fração é enviada para aterro sanitário.

Fração sobrenadante e sedimentada: $0,68 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. No processo de adensamento 5% da espuma peneirada corresponde à fração sobrenadante e 6% à fração sedimentada. Estes dois tipos de frações são enviados conjuntamente ou separadamente para leitos de secagem e, posteriormente, enviados para aterro sanitário. Outra alternativa seria seu aproveitamento energético, já que na fração sobrenadante se encontram concentrados os O&G que foram separados na etapa de adensamento. Ressalta-se que os baixos volumes não justificam a instalação de um sistema de aproveitamento energético deste material na ETE, no entanto, poderia ser atrativo para doar a empresas interessadas neste material (ROSA, 2013).

Leito de secagem: Aplicando o procedimento descrito no item 5.2.3, a área de leito de secagem requerida para disposição destas frações (sobrenadante e sedimentada) seria de $13,6 \text{ m}^2$, para a cidade de 100.000 habitantes. Esta área de leito de secagem representa um 1,5 % da área de reatores UASB.

No caso que não fosse utilizada a etapa de adensamento, a totalidade da espuma descartada seria enviada para os leitos de secagem, demandando uma área de 116 m^2 , como foi calculada no item 5.2.3. Isto implica que a utilização de uma etapa de adensamento leva a uma redução

de área de leito de secagem de 88,2%.

Tanque de adensamento: A inclusão da etapa de adensamento implica a construção de um tanque para esta finalidade. De acordo com os resultados de descarte de espuma, se tem a necessidade de um tanque $6,25 \text{ m}^3$ para esta população de 100.000 habitantes.

Como foi calculado no item 5.2.3 o volume de projeto para os reatores UASB desta população foi de $4.166,6 \text{ m}^3$, pelo qual o volume de tanque de adensamento representa o 0,15% do volume de reatores.

6 CONCLUSÕES

Em relação ao objetivo específico no. 1

A avaliação de diferentes rotinas de descarte, baseadas no sistema hidrostático de remoção de espuma, levou à definição de parâmetros operacionais que resultaram em elevadas eficiências de remoção de espuma e baixos volumes de líquido drenados. Os resultados das diferentes rotinas testadas permitiram definir as seguintes condições operacionais ótimas para o descarte:

- frequência de descarte de 5 dias;
- nível da interface espuma/biogás localizada de 2 a 5 cm abaixo da borda da canaletas;
- grau de abertura da válvula de 100%; e
- tempo de descarte de 10 s, sendo o descarte realizado em duas etapas com as mesmas condições.

A comparação estatística dos resultados obtidos, para quatro diferentes rotinas de descarte testadas, demonstrou grandes ganhos quanto à possibilidade de diminuição dos volumes de espuma a serem gerenciados numa ETE. Para a rotina de descarte mais eficiente, o volume conjunto de espuma e líquido drenados equivaleu a apenas 0,05% do volume de esgoto tratado no período compreendido entre dois descartes consecutivos. Por outro lado, o volume conjunto espuma/líquido descartado com a rotina menos eficiente correspondeu a 0,16% do volume de esgoto tratado entre dois intervalos de descarte.

Foi demonstrada a correlação positiva entre a concentração de lodo no reator e a taxa de acumulação de espuma. Além disso, os resultados de perdas de biogás no descarte mostraram-se desprezíveis em comparação com o biogás gerado.

Em relação ao objetivo específico no. 2

A avaliação do processo de desidratação da espuma em um sistema de peneiramento e leito de secagem se mostrou altamente eficiente. A espuma passante pelo sistema de peneiramento mostrou grande aptidão ao desaguamento em leitos de secagem, tendo sido observada uma elevação bastante significativa da concentração de sólidos totais, de uma concentração mediana de 0,3% (dia de descarte) para uma concentração de 89,0%, após um período de 5 dias de desidratação.

Foi observada grande retenção de O&G na espuma desidratada, retida no leito de secagem, o

que propiciou elevada qualidade ao líquido drenado através do leito, que apresentou baixa concentração de O&G. Quanto à área de leito requerida para a desidratação da espuma descartada como a aplicação da rotina mais eficiente, esta representou aproximadamente 5,3% da área requerida para leitões de secagem utilizados para o desaguamento de lodo.

Em relação ao objetivo específico no. 3

Os resultados dos testes de adensamento da espuma foram promissores, tendo-se obtido uma ótima separação da fase clarificada, em relação à fase sólida sedimentada e sobrenadante. A fração clarificada representou um volume expressivo, entre 83 e 93% (percentil 25-75%) do volume total removido durante as operações de descarte. Esta fração apresentou concentrações medianas de ST, STV, DQO, DBO e O&G dentro as faixas usuais para o esgoto bruto, indicando, portanto, que pode ser retornada ao reator UASB. A fração sobrenadante representou um volume entre 3,0 e 6,4% (percentil 25-75%) e a fração sedimentada um volume entre 1,3 e 13,0% (percentil 25-75%). Em relação à fração flutuante, esta foi avaliada mediante testes de biodegradabilidade anaeróbia, encontrando-se rendimentos de metano na faixa de 143,4 a 156,2 mLCH₄.gSTV⁻¹, considerados muito baixos se comparados ao potencial de produção de biogás no reator. Todavia, o elevado conteúdo de O&G da fração sobrenadante confere um atrativo se utilizado como matéria prima para diferentes fins.

7 REFERÊNCIAS

- ABNT. *Elaboração de projeto hidráulicos-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitarios-ABNT NBR 12209*. Rio de Janeiro-Brasil: ABNT, 2011
- APHA. *Standard Methods For de Examination of Water and Wastewater*. 22 TH ed. Whashington: American Public Health Association, 2012.
- BEJAR, D. O. *Desaguamento em leitos de secagem de lodo anaeróbio submetido ao tratamento térmico com utilização do biogás*. 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- BIOPROCESS CONTROL SWEDEN AB. *AMPTS II Automatic Methane Potential Test System*. Lund: Bioprocess Control Sweden AB, 2013
- BRUNETTI, F. *Mecânica dos Fluidos*. 2. ed. São Pablo: Perason Prentice Hall, 2008.
- CHERNICHARO, C. A. L. *et al.* Anaerobic sewage treatment : state of the art , constraints and challenges. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 14, n. 4, p. 649–679, 2015.
- CHERNICHARO, C. A. L. *Princípios de tratamento biológico de águas residuarias-Reactores Anaeróbios*. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-DESA/UFMG, 2007.
- FERREIRA, B. O. *Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás*. 2015. 117 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015
- FNR-(FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE). *Guia Prático do Biogás - Geração e Utilização*. Gülzow: FNR, 2010
- GARCIA, G. P. *et al.* Biological oxidation of sulfides by microorganisms present in the scum layer of UASB reactors treating domestic wastewater. *Water Science & Technology*, v. 66, n. 9, p. 1871–8, 2012.
- GONÇALVES, R. F. *et al.* Desidratação de lodo de esgotos. In: PROSAB (Org.). *Aproveitamento de lodo gerado em estações de tratamento de água e esgotos sanitários, inclusive com a utilização de técnicas consorciadas com resíduos sólidos urbanos*. 1ra Edição ed. Curtiva: Departamento de Engenharia sanitária e Ambiental – UFMG, 2001. p. 273.
- HALALSHEH, M. *et al.* Effect of SRT and temperature on biological conversions and the

related scum-forming potential. *Water research*, v. 39, n. 12, p. 2475–82, jul. 2005.

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

LOBATO, L.; CHERNICHARO, C. A. L.; SOUZA, C. Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater. *Water Science and Technology*, v. 66, n. 12, p. 2745–2753, 2012.

LONG, J. H. *et al.* Anaerobic co-digestion of fat, oil, and grease (FOG): A review of gas production and process limitations. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 90, n. 3, p. 231–245, 2012.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. *Plano Nacional de Saneamento Básico - PLANSAB*. Brasília-DF: Ministério das Cidades, 2013

NOYOLA, A. R. *et al.* Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America. *Clean - Soil, Air, Water*, v. 40, n. 9, p. 926–932, 2012.

OLIVEIRA, S. C. *Apostila Tratamento estatístico de dados ambientais*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG/DESA, 2014

PASSEGGI, M.; LÓPEZ, I.; BORZACCONI, L. Integrated anaerobic treatment of dairy industrial wastewater and sludge. *Water Science and Technology*, v. 59, n. 3, p. 501–506, 2009.

PEREIRA, J. *et al.* *Aplicação de uma inovadora configuração de reator UASB ao tratamento de esgoto doméstico objetivando o controle da espuma*. Rio de Janeiro-Brasil: Anais 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental, 2015

PEREIRA, J. *Controle da formação de espuma e remoção de matéria orgânica em reator UASB com duplo estágio de coleta de biogás*. 2007. 67 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

PEREIRA, J. *Duplo estágio de coleta de biogás (DECB), aplicado ao tratamento de esgoto sanitário, objetivando o controle da espuma e a granulação*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012

PINTO, J. *et al.* Artigo. *Quimica Nova*, v. 37, n. 4, p. 597–602, 2014.

RAMOS, R. *Avaliação da influência da operação de descarte de lodo no desempenho de reatores UASB em estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal*. 2008. 153 f. Brasília, 2008.

RAPOSO, F. *et al.* Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, v. 86, n. 8, p. 1088–1098, 12 ago. 2011.

RINZEMA, A. *et al.* Bactericidal effect of long chain fatty acids in anaerobic digestion. v. 66, n. 1, 1981.

ROSA, A. *et al.* *Acumulação e remoção de espuma em reatores UASB : Estudo de caso ETE Laboreaux – Itabira / MG.* . Goiânia, Brasil: Anais 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental, 2013

ROSA, A. *Aproveitamento de biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto.* Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG/DESA, 2013

ROSA, A. *et al.* Improving performance and operational control of UASB reactors via proper sludge and scum discharge routines. *Water Practice & Technology*, v. 7, n. 3, p. 1–11, 1 out. 2012.

ROSA, A. *et al.* *Potencial energético dos subproductos sólidos (Lodo excedente e espuma) de reatores UASB : Estudo de caso da ETE Laboreaux - Itabira/ MG.* Rio de Janeiro-Brasil: ABES, 2015

ROSS, B. Z. L. *et al.* *Caracterização da espuma produzida em reatores anaeróbios de manta de lodo, Estado do Paraná.* Goiânia-Brasil: Anais 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental, 2013

ROSS, B. Z. L. *et al.* *Desaguamento de espuma produzida em reatores anaeróbios de manta de lodo em leitos de secagem no estado do Paraná.* Rio de Janeiro-Brasil: Anais 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental, 2015.

ROSS, B. Z. L. *Escuma de reatores anaeróbios tratando esgotos domésticos em escala real: Produção, caracterização e proposição de parâmetros para seu gerenciamento.* Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Curitiba: Universidade Federal de Paraná, 2015

SALES, E. *et al.* Tratamento térmico de lodo anaeróbio com utilização do biogás gerado em reatores UASB: avaliação da autossustentabilidade do sistema e do efeito sobre a higienização e a desidratação do lodo Thermal treatment of anaerobic sludge utilizing biogas produced. *Eng Sanit Ambient*, n. 32, p. 337–346, 2009.

SANTOS, A. *Remoção, tratamento e valoração de espuma proveniente de reatores UASB*

aplicados ao tratamento de esgoto doméstico. 2014. 115 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014

SOBRINHO, P. *Curso Internacional de Técnicas em Tratamento de Esgoto*. São Paulo: SABESP-JICA, 2009

SOUZA, C. L. *Estudo quantitativo e qualitativo de espuma acumulada em reatores UASB*. 2006. 130 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2006

SOUZA, C. L. *et al.* 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, ago. 2006.

TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. *Wastewater Engineering. Treatment Disposal Reuse*. 4. ed. New York: McGraw-Hill Inc, 2003.

VAN LIER, J. B. *et al.* Celebrating 40 years anaerobic sludge bed reactors for industrial wastewater treatment. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 14, n. 4, p. 681–702, 2015.

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

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de engenharia sanitária e ambiental – DESA/UFMG, 2014.