



MARESSA SOARES DE SOUSA

**OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DO DESCARTE DE LODO EXCEDENTE EM
REATORES DE FLUXO ASCENDENTE E MANTA DE LODO (UASB)
TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO**

FORTALEZA – CEARÁ

2012



MARESSA SOARES DE SOUSA

**OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DO DESCARTE DE LODO EXCEDENTE EM
REATORES DE FLUXO ASCENDENTE E MANTA DE LODO (UASB)
TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO**

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal do Ceará como requisito para obtenção do título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Bosco Mattos Cattony

Co-Orientador: Prof. Dr. Renato Carrhá Leitão

FORTALEZA – CEARÁ

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S725o Sousa, Maressa Soares de.
 Otimização operacional do descarte de lodo excedente em reatores de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB) tratando esgoto doméstico / Maressa Soares de Sousa. - 2012.
 96 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental, Campus Fortaleza, 2012.
 Orientação: Prof. Dr. Eduardo Bosco Mattos Cattony.
 Coorientação: Prof. Dr. Renato Carrhá Leitão.

1. Reator UASB. 2. Manta de Lodo. 3. Sedimentabilidade. 4. Lodo Excedente. I. Título.

CDD 628

MARESSA SOARES DE SOUSA

**OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DO DESCARTE DE LODO EXCEDENTE EM
REATORES DE FLUXO ASCENDENTE E MANTA DE LODO (UASB)
TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO**

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal do Ceará como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Aprovada em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Bosco Mattos Cattony (Orientador)

Instituto Federal do Ceará - IFCE

Prof. Dr. Renato Carrhá Leitão

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA

Prof. Dr. Rinaldo dos Santos Araújo

Instituto Federal do Ceará – IFCE

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ser a minha rocha firme.

Ao meu Precioso, Edson, pelo incentivo em todos os momentos.

Ao Professor Dr. Eduardo Bosco Mattos Cattony por me orientar neste trabalho com toda paciência e dedicação.

Ao Professor Dr. Renato Carrhá Leitão pelas reuniões que tanto clarearam a minha mente e me inspiraram a prosseguir.

Aos professores que compõem esta banca examinadora: Professor Dr. Eduardo Bosco Mattos Cattony, Professor Dr. Renato Carrhá Leitão e Professor Dr. Rinaldo dos Santos Araújo pelo auxílio na melhoria do trabalho.

A CAPES e ao CNPq pelo financiamento da pesquisa.

Ao IFCE por abrir os caminhos para o meu crescimento profissional.

Ao PGTGA, na pessoa do Prof. Dr. Rinaldo dos Santos Araújo pela oportunidade, pelo auxílio e estrutura física.

Aos professores do PGTGA que auxiliaram no meu aprendizado, em especial a Profa. Dra. Nájila Cabral, ao Prof. Dr. Eduardo Cabral e ao Prof. Dr. Adeildo Cabral.

A CAGECE, na pessoa dos funcionários: Ronner, Raquel, Adriano, Silvano e Antônio, pelo apoio em todo o experimento.

A Heineken, na pessoa do Sr. Jackson Medina pelo lodo e informações cedidas referentes ao seu reator UASB.

Aos alunos do curso de Saneamento Ambiental do IFCE: Renata, Vítor, Natália, Thiago e Daiane, pela participação direta neste trabalho.

Aos laboratórios do IFCE que deram assistência à pesquisa: LTQ, LQA, Labiosan e Laboratório de Saneamento.

A minha irmã e amiga Lysandra pela disponibilidade em ajudar, pelo carinho e atenção em todas as horas.

Aos meus familiares pelo apoio.

A todos que acreditaram neste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Geral	3
2.2 Específicos	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Tratamento Anaeróbio de Esgotos	5
3.1.1 Sistemas anaeróbios de tratamento	7
3.1.2 Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB)	8
3.1.2.1 Problemas operacionais comuns em reatores UASB	11
3.2 Lodo Excedente	13
3.3 Sedimentabilidade da manta de lodo	15
4 MATERIAL E MÉTODOS	19
4.1 Coleta das Amostras de Lodo	20
4.2 Análises Físico-Químicas	21
4.3 Unidade Experimental de Sedimentação (UES)	21
4.4 Tratamento Matemático	24
4.4.1 Sedimentabilidade do lodo	24
4.4.2 Expansibilidade do lodo	24
4.5 Tratamento Estatístico	25
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1 Unidade Experimental de Sedimentação (UES)	33
5.2 Análise Estatística	48
5.2.1 Validação do experimento	50
6 CONCLUSÕES	58
7 RECOMENDAÇÕES	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
ANEXOS	

RESUMO

O presente trabalho visou dar continuidade ao estudo da sedimentação de lodo em reatores do tipo UASB, realizado por Leitão (2004). Ensaios de sedimentabilidade da manta de lodo foram realizados na tentativa de se encontrar padronização de uma metodologia simplificada e eficiente, a ser executada em escala real para determinação da frequência e volume adequado de lodo excedente para descarte, de modo a não haver efeitos negativos na eficiência do processo de tratamento anaeróbio. Sendo assim, ensaios foram realizados, em uma Unidade Experimental de Sedimentação, com amostras de 19 diferentes Estações de tratamento de esgoto. Após análise dos dados obtidos, verificou-se que o teste IVL não serve como parâmetro para lodos anaeróbios. Para efeito prático na rotina de operação de um reator tipo UASB, foram feitas as seguintes sugestões: (1) Operar o reator cheio de lodo e aplicar os parâmetros de Viselind para dimensionar um sedimentador a ser instalado logo após o reator, ou, (2) Usar o intervalo de confiança da variação das médias das alturas da manta de lodo, para estimar o volume de descarte de lodo excedente.

Palavras-Chaves: Reator UASB; Manta de Lodo; Sedimentabilidade; Lodo Excedente.

ABSTRACT

The present work aimed to continue the study of sludge sedimentation in UASB reactors, conducted by Leitão (2004). Sludge blanket settleability assays were performed to determining the appropriate frequency and volume of excess sludge for disposal. Settleability assays of sludge blanket were performed in an attempt to find a simplified method for determining the appropriate frequency and volume of excess sludge for disposal in real scale anaerobic reactors. Therefore, tests were conducted in an Experimental Unit of Sedimentation on 19 different samples of different sewage treatment plants. After analyzing the data obtained, it was found that the SVI test wasn't proper as parameter for anaerobic sludge and, for practical effect in the routine operation of a UASB reactor, the following suggestions were made: (1) Operating the reactor filled with sludge and apply Viselind parameters to scale a settler to be installed after the reactor, or, (2) Use confidence interval of variation of the mean height of the sludge blanket to estimate the volume of disposal of excess sludge.

Keywords: UASB Reactor, Sludge Blanket, settleability, Sludge Excess.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração, coleta e tratamento de esgotos convencionais.	4
Figura 2 - Fluxograma representativo do tratamento anaeróbio identificando a atuação dos microrganismos responsáveis por cada etapa.	6
Figura 3 - Desenho esquematizado do reator UASB.	9
Figura 4 - Organograma representativo das fases da pesquisa.	19
Figura 5 – Representação esquematizada do ensaio realizado na UES.	22
Figura 6 – Unidade Experimental de Sedimentação (UES) em atividade.	23
Figura 7 – Representação das alturas das mantas de lodo alcançadas nos diferentes ensaios e as respectivas ETEs de onde foram coletadas.	27
Figura 8 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Aracapé com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	29
Figura 9 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Novo Barroso com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	29
Figura 10 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Riacho Doce com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	29
Figura 11 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Curió I com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	29
Figura 12 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Paupina com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	29
Figura 13 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Zeza do Tijolo com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	29
Figura 14 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Pajuçara com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	29
Figura 15 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Sítio Santana com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	29
Figura 16 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Curió II com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	30
Figura 17 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Heineken com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	30
Figura 18 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-São Francisco com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	30

Figura 19 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Pôr-do-Sol com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	30
Figura 20 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Guaramiranga com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	30
Figura 21 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Aratuba com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	30
Figura 22 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Mulungu com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	30
Figura 23 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Cascavel com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	30
Figura 24 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Rosalina com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	31
Figura 25 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Dakota com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	31
Figura 26 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Pedro Câmara com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).	31
Figura 27 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Aracapé.	32
Figura 28 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Novo Barroso.	32
Figura 29 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Riacho Doce.	33
Figura 30 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE- Curió I.	33
Figura 31 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Paupina.	33

Figura 32 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Zeza do Tijolo	33
Figura 33 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Pajuçara	33
Figura 34 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Sítio Santana	33
Figura 35 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Curió II	33
Figura 36 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Heineken	33
Figura 37 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-São Francisco	34
Figura 38 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Pôr-do-Sol	34
Figura 39 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Guaramiranga.	34
Figura 40 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Pacatuba	34
Figura 41 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Mulungu	34
Figura 42 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Cascavel.	34
Figura 43 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Rosalina.	34
Figura 44 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Dakota.	34
Figura 45 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Pedro Câmara	35
Figura 46 - Resultados da concentração do lodo (X) e $\ln(U)$ para o lodo da ETE-Aratuba.	35

- Figura 47** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Aracapé. 41
- Figura 48** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Novo Barroso. 41
- Figura 49** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Riacho Doce. 41
- Figura 50** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Curió I. 41
- Figura 51** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Paupina. 41
- Figura 52** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Zeza do Tijolo. 41
- Figura 53** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Pajuçara. 42
- Figura 54** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Sítio Santana. 42
- Figura 55** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Curió II. 42
- Figura 56** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Heineken. 42
- Figura 57** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-São Francisco. 42
- Figura 58** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Pôr-do-Sol. 42
- Figura 59** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Guaramiranga. 42
- Figura 60** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Aratuba. 42
- Figura 61** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Mulungu. 43

- Figura 62** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Cascavel. 43
- Figura 63** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Rosalina. 43
- Figura 64** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Dakota. 43
- Figura 65** - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Pedro Câmara. 43
- Figura 66** - Resultados da expansão do lodo (ϵ) e $\log(U)$ para lodo da ETE-Aratuba. 44
- Figura 67** - Histograma da variável altura da manta de lodo (cm). 49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sistemas utilizados para tratamento anaeróbio de esgoto segundo Chernicharo (1997).	08
Tabela 2 - Resultados da avaliação de 166 ETEs em Minas Gerais e São Paulo, segundo Oliveira e Von Sperling (2005).	10
Tabela 3 - Comparação entre os resultados reais segundo Oliveira e Von Sperling (2005) e na literatura, quanto à eficiência de diversos sistemas de tratamento, na remoção de DBO, DQO e SST.	11
Tabela 4 - Produção de lodo para os diferentes tipos de tratamento de esgoto.	13
Tabela 5 - ETEs abordadas na pesquisa, seus tipos de tratamento, localidade e mês em que foi realizado o ensaio.	20
Tabela 6 - Análises Físico-químicas do lodo das ETEs.	21
Tabela 7 - Dados operacionais de todas as ETEs abordadas nesse trabalho.	36
Tabela 8 – Dados operacionais de todas as ETEs estudadas e parâmetros de sedimentabilidade dos respectivos lodos calculados pelo modelo de Vesilind na velocidade ascensional de 0,56m/h.	37
Tabela 9 - Dados operacionais de todas as ETEs estudadas e parâmetros de sedimentabilidade dos respectivos lodos calculados pelo modelo de Vesilind na velocidade ascensional de 0,75m/h.	38
Tabela 10 - Dados operacionais de todas as ETEs estudadas e parâmetros de sedimentabilidade dos respectivos lodos calculados pelo modelo de Vesilind na velocidade ascensional de 1,125m/h.	39
Tabela 11 - Dados operacionais de todas as ETEs estudadas e parâmetros de sedimentabilidade dos respectivos lodos calculados pelo modelo de Vesilind na velocidade ascensional de 2,25m/h.	40
Tabela 12 - Dados operacionais de todas as ETEs estudadas e parâmetros de expansibilidade dos respectivos lodos calculados pelo modelo de Richardson e Zaki na velocidade ascensional de 0,56m/h.	45
Tabela 13 - Dados operacionais de todas as ETEs estudadas e parâmetros de expansibilidade dos respectivos lodos calculados pelo modelo de Richardson e Zaki na velocidade ascensional de 0,75m/h.	46

Tabela 14 - Dados operacionais de todas as ETEs estudadas e parâmetros de expansibilidade dos respectivos lodos calculados pelo modelo de Richardson e Zaki na velocidade ascensional de 1,125m/h.	47
Tabela 15 - Dados operacionais de todas as ETEs estudadas e parâmetros de expansibilidade dos respectivos lodos calculados pelo modelo de Richardson e Zaki na velocidade ascensional de 2,25m/h.	48
Tabela 16 - Estatísticas descritivas da altura da manta de lodo observada em relação à velocidade ascensional padrão adotada.	49
Tabela 17 - Estatísticas descritivas da altura observada em relação às velocidades variada em função de cada velocidade padrão adotada.	50
Tabela 18 - Estatísticas descritivas da altura observada em relação à velocidade padrão adotada.	51
Tabela 19 - Teste de Kruskal Wallis para diferença de média da altura da manta do lodo em relação às velocidades variadas com velocidade padrão 0,56m/h.	52
Tabela 20 - Análise das velocidades comparadas na Tabela 19.	52
Tabela 21 - Teste de Kruskal Wallis para diferença de média da altura da manta do lodo em relação às velocidades variadas com velocidade padrão 0,75m/h.	53
Tabela 22 - Análise das velocidades comparadas na Tabela 21.	53
Tabela 23 - Teste de Kruskal Wallis para diferença de média da altura da manta do lodo em relação às velocidades variadas com velocidade padrão 1,125m/h.	53
Tabela 24 - Análise das velocidades comparadas na Tabela 23.	54
Tabela 25 - Teste de Kruskal Wallis para diferença de média da altura da manta do lodo em relação às velocidades variadas com velocidade padrão 2,25m/h.	54
Tabela 26 - Análise das velocidades comparadas na Tabela 25.	54
Tabela 27 - Comparação das médias da velocidade variada para uma velocidade padrão de 0,56 m/h.	54
Tabela 28 - Comparação das médias da velocidade variada para uma velocidade padrão de 0,75m/h.	55
Tabela 29 - Comparação das médias da velocidade variada para uma velocidade padrão de 1,125m/h.	56
Tabela 30 - Comparação das médias da velocidade variada para uma velocidade	56

padrão de 2,25m/h.

Tabela 31 - Intervalo de confiança para variação das médias das alturas da manta do lodo em relação à velocidade. 57

Tabela 32 - Análise das velocidades comparadas e o efeito na altura da manta de lodo. 57

Tabela 33 - Volume de lodo excedente calculado a partir da variação das médias das alturas da manta de lodo em função a U real utilizada nas diferentes ETEs. 59

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a	Constante empírica
A	Área da secção transversal
b	Constante de expansibilidade
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ε	Expansão do Lodo
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPC	Estação de Pré-tratamento e Condicionamento
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FA	Filtro Anaeróbio
FS	Fossa Séptica
h	Altura do leito de lodo
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
IVL	Índice Volumétrico do Lodo
k	Parâmetro empírico de Vesilind
LA	Lodos Ativados
pH	Potencial Hidrogeniônico
RAFA	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
SST	Sólidos Suspensos Totais
TRC	Tempo de Retenção Celular
U	Velocidade Ascensional

U_0	Constante empírica de Vesilind
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UES	Unidade Experimental de Sedimentação
UFC	Universidade Federal do Ceará
V_0	Volume de lodo
X	Concentração da manta de lodo
X_0	Concentração do lodo na amostra composta

1 INTRODUÇÃO

No estado do Ceará, a companhia de água e esgoto (CAGECE) é responsável pelo tratamento e lançamento do esgoto doméstico tratado no meio ambiente. Diferentes sistemas de tratamento de esgoto são utilizados pela CAGECE como, por exemplo; lagoas, fossas sépticas/filtros anaeróbios, lodos ativados, entre outros. A escolha do tipo de sistema, feita pela companhia, para cada localidade, é baseada em análises de custo-benefício, onde a prioridade são os sistemas com melhor eficiência na remoção de matéria orgânica. O sistema denominado “UASB” (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket* – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e manta de lodo), também conhecido como RAFA, é um dos sistemas de tratamento de efluentes mais promissores usados pela companhia.

O reator do tipo UASB é uma eficiente solução para tratamento de esgotos domésticos, pois é um sistema simples que apresenta uma baixa produção de sólidos, cerca de 5 a 10 vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios. Além disso, apresenta alta eficiência de tratamento, baixa demanda por área e trabalha com elevadas cargas orgânicas.

Entretanto, existem problemas operacionais que podem prejudicar a eficiência final do tratamento. Como principais problemas ocorrentes nas ETEs, utilizadoras do sistema UASB, estão: a passagem de flocos de lodo para o efluente, a obstrução do sistema, a frequência e quantificação do descarte de lodo excedente e a dificuldade no transporte e disposição do lodo.

Todos estes problemas estão ligados direta ou indiretamente com a produção de lodo (biomassa). Portanto, a grande dificuldade dos operadores desses sistemas é conseguir identificar quando a manta de lodo cresce exageradamente e também a quantificação desse crescimento. Este lodo que cresce em excesso e que deve ser descartado é chamado de lodo excedente. Dois cenários diferentes podem ocorrer devido a falta de informações sobre o lodo excedente no sistema: (1) a manta de lodo cresce excessivamente e flocos começam a sair junto ao esgoto tratado, e (2) ocorrência de descarte precoce de lodo ou do descarte excessivo de lodo. Os dois diferentes cenários implicam em perdas reais de eficiência no processo de tratamento (CARVALHO *et al.*, 2005; RAMOS, 2008).

Atualmente a CAGECE dispõe de 17 estações de tratamento de esgoto (ETE) utilizando o sistema UASB, na Região Metropolitana de Fortaleza – RMF (Fortaleza,

Maracanaú e Caucaia) e 23 ETEs com esse mesmo sistema nos municípios do interior do Ceará, conforme informações obtidas diretamente na própria companhia. Inserido neste contexto, a presente proposta de pesquisa visa dar continuidade ao estudo da sedimentação de lodo em reatores do tipo UASB realizado por Leitão (2004). Ensaios de sedimentabilidade da manta de lodo foram realizados na tentativa de se encontrar a padronização de uma metodologia simplificada e eficiente a ser executada em escala real para determinação da frequência e volume adequado de lodo excedente para descarte, de modo a não haver efeitos negativos na eficiência do processo de tratamento anaeróbio.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Desenvolver uma metodologia simplificada para otimização do descarte do lodo excedente em reatores UASB através do estudo da sedimentabilidade da manta de lodo.

2.2 Específicos

- ✓ Avaliar a influência da concentração da manta de lodo e velocidades ascensionais sobre a sedimentabilidade do lodo;
- ✓ Avaliar a sedimentabilidade e expansibilidade do lodo segundo os modelos de Vesilind e Richardson e Zaki;
- ✓ Comparar os resultados de Índice Volumétrico do Lodo (IVL) com a sedimentabilidade do lodo anaeróbio.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O tratamento biológico de esgoto doméstico ocorre pela ação de microrganismos que degradam os compostos orgânicos presentes no esgoto. Na Figura 1 estão representadas, de forma didática, as etapas de geração e do processo de tratamento biológico dos esgotos domésticos.



Figura 1 – Geração, coleta e tratamento de esgotos domésticos. Fonte: COPASA (2010).

Na primeira etapa, o esgoto é recolhido das residências, transportado pela rede coletora e encaminhado à estação de tratamento de efluentes (ETE). Na ETE o esgoto passa inicialmente pelo gradeamento, onde há a retenção de sólidos grosseiros (pedaços de pano, madeiras, latas e plásticos). Em seguida, o esgoto segue lentamente por canais, chamados de desarenadores, para que os materiais mais finos, como areia, possam sedimentar. A próxima etapa é a oxidação biológica, que consiste no crescimento de microrganismos que se alimentam da matéria orgânica presente. Estes microrganismos se agrupam em flocos que sedimentam no fundo dos reatores biológicos, formando o lodo biológico. O restante do material, que é o resíduo líquido tratado, sai do sistema,

podendo ser lançado nos recursos hídricos, sem prejuízo ao meio ambiente. Para finalizar o processo, a última etapa diz respeito à destinação final do lodo resultante, podendo ser secado ou prensado, e encaminhado ao aterro sanitário; ou ainda, podendo ser reutilizado na agricultura, após a higienização (COPASA, 2010).

O tratamento biológico pode ser aeróbio e anaeróbio, sendo esse último o mais complexo e sensível, pois o processo de crescimento e obtenção de energia pelos microrganismos anaeróbios envolve vários caminhos e ciclos (MEYSTRE, 2007).

Segundo Abreu e Zaiat (2008), nos últimos anos ocorreram importantes avanços nas tecnologias voltadas ao tratamento biológico, com destaque aos lodos ativados, tecnologia aeróbia, e reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB), como um exemplo de tecnologia anaeróbia.

Passig (2005) ressalta que os principais sistemas anaeróbios utilizados no Brasil para tratamento de efluentes líquidos são as lagoas anaeróbias, o decanto-digestor, o filtro anaeróbio, o reator anaeróbio de leito expandido e/ou fluidificado, e o reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB). Ainda, segundo Rocha (2009), os reatores UASB são uma alternativa muito vantajosa para o tratamento de esgotos no Brasil, já que os condicionantes de clima, somados aos baixos custos de instalação e operação favorecem a utilização desse tipo de sistema.

3.1 Tratamento Anaeróbio de Esgotos

O uso da água nas suas diversas formas tem como resultado a geração de despejos líquidos. Esses despejos devem ser coletados e encaminhados as ETEs.

O tratamento biológico de esgoto tem como objetivo principal a remoção do material orgânico. Sendo assim, distinguem-se dois processos básicos para o tratamento dos esgotos: (1) o mecanismo aeróbio, quando a matéria orgânica é oxidada até dióxido de carbono em processo onde o oxigênio é o aceptor final de elétrons e (2) o mecanismo anaeróbio, quando a matéria orgânica é oxidada por processos que utilizem outros aceptores finais de elétrons (como por exemplo o sulfato e o nitrato) ou por processo fermentativos. Nesse segundo processo os produtos finais são diversos, porém, entre os gases predominam o metano e dióxido de carbono (FERNANDES, 2000).

Para o tratamento anaeróbio poder ocorrer, diferentes microrganismos precisam atuar na degradação da matéria orgânica, destacando-se as bactérias fermentativas acidogênicas, as bactérias acetogênicas e as arqueas metanogênicas. O conjunto desses

microrganismos trabalha convertendo a matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, além de produzirem novas células microbianas (CHERNICHARO, 1997).

Na Figura 2 está apresentado o esquema geral do tratamento anaeróbico, onde há a atuação de cada tipo específico de microrganismo.

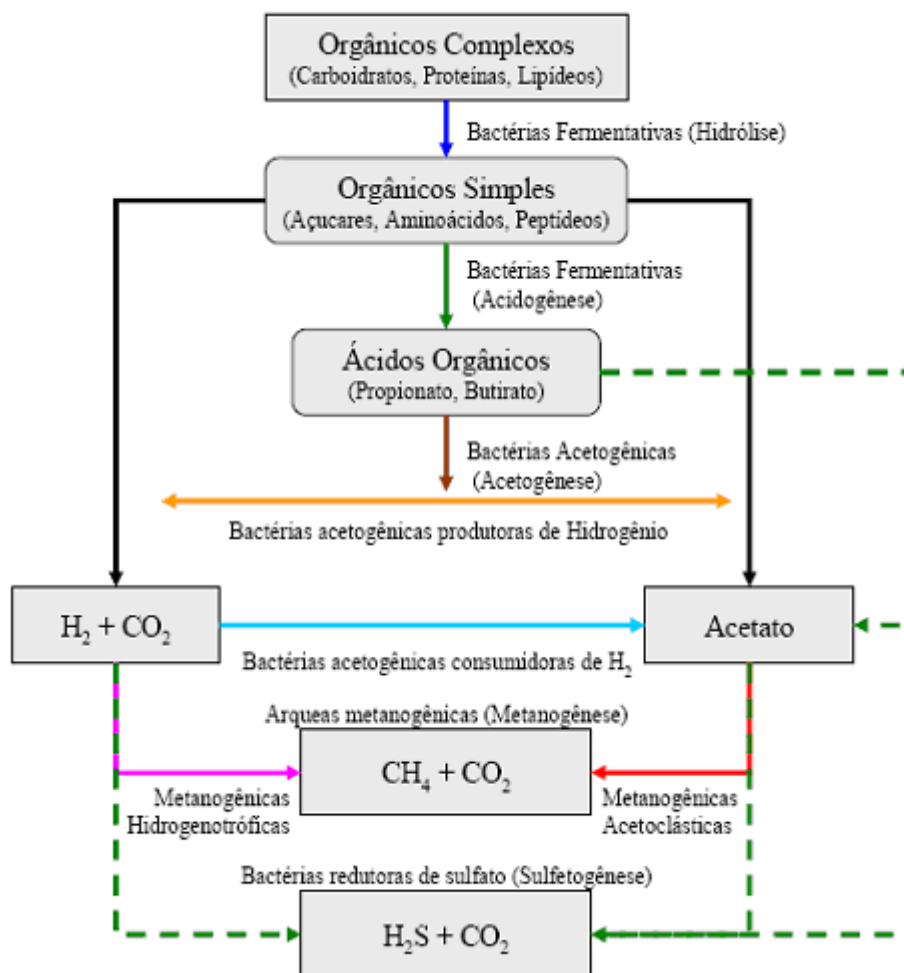


Figura 2 - Fluxograma representativo do tratamento anaeróbico identificando a atuação dos microrganismos responsáveis por cada etapa. Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997).

O processo de digestão anaeróbica, como está representado na Figura 2 é dividido em quatro fases principais; Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese.

Na primeira etapa da estabilização da matéria orgânica, chamada de hidrólise, ocorre a quebra de materiais particulados complexos (polímeros) em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores) os quais podem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas. Essa quebra ocorre por meio de exoenzimas

excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Entre os compostos produzidos estão incluídos ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas. As bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato apropriado para as bactérias metanogênicas. Dessa forma, as bactérias acetogênicas fazem parte de um grupo metabólico intermediário que produz substrato para as metanogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato (von SPERLING, 1996).

A etapa final no processo global de degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono é efetuada pelas arqueas metanogênicas. Elas utilizam somente um limitado número de substratos, compreendendo ácido acético, hidrogênio, dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono. Em função de sua afinidade por substrato e magnitude de produção de metano, as arqueas metanogênicas são divididas em dois grupos principais, um que forma metano a partir de ácido acético ou metanol (acetoclásticas), e o segundo que produz metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono (hidrogenotróficas) (von SPERLING, 1996).

3.1.1 Sistemas anaeróbios de tratamento

Os sistemas anaeróbios são ambientes favoráveis ao crescimento e desenvolvimento de microrganismos que degradam matéria orgânica sem utilizar oxigênio, podendo ser classificados em Sistemas convencionais e Sistemas de alta taxa. Os sistemas convencionais são caracterizados por operarem com baixas cargas orgânicas, não dispondo de mecanismos para que ocorra a mistura completa e operam com tempo de detenção hidráulica (TDH) bastante elevado, cerca de 30 a 60 dias (METCALF e EDDY, 1995 *apud* CHERNICHARO, 1997).

No entanto, os sistemas de alta taxa são operados com baixos valores de TDH e elevados tempos de retenção celular (TRC). Esses sistemas são divididos em dois grupos; com crescimento de biomassa aderida ou com biomassa dispersa. Esse último grupo relaciona-se a presença de flocos ou grânulos de microrganismos inteiramente livres, já o primeiro grupo, pressupõe o desenvolvimento de microrganismos agregados a um material inerte, levando a formação de um filme biológico (CHERNICHARO, 1997).

Os principais sistemas anaeróbios utilizados para o tratamento de esgoto estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Sistemas utilizados para tratamento anaeróbio de esgoto segundo Chernicharo (1997).

Sistemas Convencionais	Sistemas de Alta Taxa	
	<i>Com crescimento aderido</i>	<i>Com crescimento disperso</i>
Digestores de lodo	Reatores de leito fixo	Reatores de dois estágios
Tanques sépticos	Reatores de leito rotatório	Reatores de chicanas
Lagoas anaeróbias	Reatores de leito expandido / fluidificado	Reatores de manta de lodo Reatores com leito granular expandido

Fonte: Chernicharo (1997).

Os sistemas de alta taxa são divididos em dois grupos, conforme mostrado na Tabela 1, que são os sistemas com crescimento bacteriano aderido e sistemas com crescimento dispersos.

No primeiro grupo estão os reatores de leito fixo, leito rotatório e leito expandido. Os reatores anaeróbios são caracterizados prioritariamente pela retenção da biomassa ativa no interior dos reatores, portanto, os reatores de leito fixo utilizam-se de um material suporte para imobilizar a biomassa, a fim de evitar a saída da mesma com o efluente. Os primeiros reatores anaeróbios de leito fixo foram denominados de filtros anaeróbios (ABREU e ZAIAT, 2008). No segundo grupo apresentado, estão os sistemas anaeróbios com crescimento disperso, onde estão inseridos os reatores de dois estágios, os reatores de chicanas, os reatores de manta de lodo e os reatores de leito granular expandido.

3.1.2 Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo - UASB

Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), denominado no Brasil como Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA) e manta de lodo, está entre os mais utilizados na Europa e no Brasil, para tratamento de esgoto sanitário (VALÉRIO, 1994 *apud* POETSCH e KOETZ, 1998). As características gerais, presentes em todos os processos anaeróbios são: períodos curtos de detenção hidráulica, alta concentração de massa celular no reator e baixo custo de operação.

No entanto, existem diversas características próprias dos reatores UASB, como a capacidade de reter no seu interior altas quantidades de biomassa ativa por longos

períodos, fazendo com que a idade do lodo seja muito maior que o TDH. Isso acontece pelo resultado da instalação do separador trifásico na parte superior do reator, e do processo de granulação (ou floculação) que promove uma alta sedimentabilidade do lodo (LEITÃO *et al.*, 2005).

A utilização dessa tecnologia é favorável nos países tropicais devido as elevadas temperaturas locais. O emprego de um processo anaeróbio é muito favorecido na ocorrência de temperaturas acima de 20°C (MIKI, 2010).

Na Figura 3 está representado um esquema do reator UASB, identificando as zonas de digestão e sedimentação, mostrando o seu funcionamento e cada parte do reator.

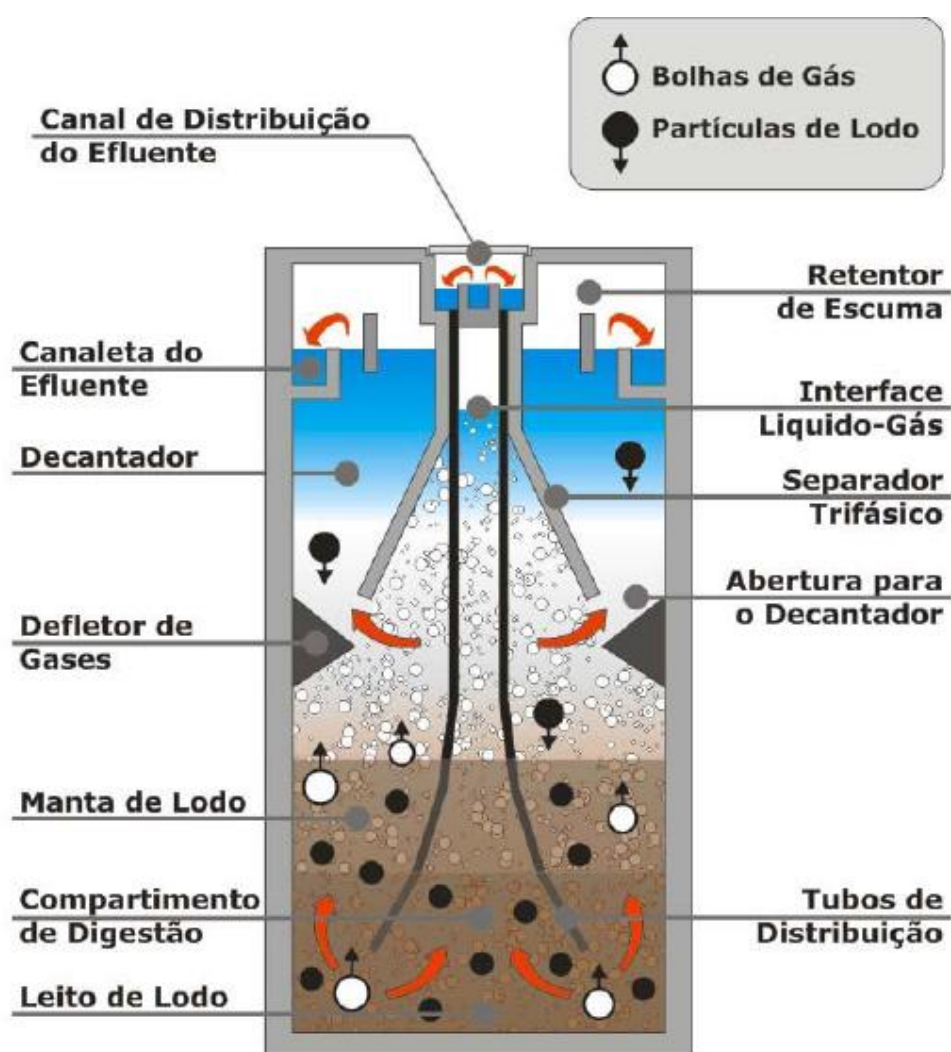


Figura 3 - Desenho esquematizado do reator UASB. Fonte: Costa (2009) e Chernicharo (1997).

O funcionamento de um reator do tipo UASB começa pela entrada do esgoto bruto pela parte inferior do sistema. O esgoto é distribuído uniformemente pelo fundo do reator a fim de evitar caminhos preferenciais. Logo depois, o esgoto atravessa as camadas de leito (zona de digestão e zona de sedimentação), e manta de lodo, de concentração mais dispersa que o leito. Os defletores de gás direcionam as bolhas para a campânula de coleta, enquanto que o líquido mais os sólidos em suspensão são dirigidos para o compartimento da zona de decantação, onde, grande parte dos sólidos sedimenta e retorna para o fundo do reator (MIKI, 2010).

Uma digestão anaeróbia eficiente, nos sistemas UASB, depende do escoamento ascensional do afluente, que deve assegurar um contato intenso entre o material orgânico e o lodo; e do decantador interno que irá garantir a retenção da massa de lodo no sistema (CATUNDA *et al.*, 1998).

Oliveira e Von Sperling (2005) estudaram o desempenho de 166 ETEs em funcionamento nos estados de Minas Gerais e São Paulo (Tabela 2). Os sistemas operados nessas ETEs foram: fossa séptica seguida de filtro anaeróbio (FS+FA), lagoas facultativas (LF), lodos ativados (LA), reatores UASB operando isoladamente, e, reatores UASB seguidos por pós-tratamento (UASB+POS). Os sistemas baseados em reatores UASB seguidos de pós-tratamento foram os que obtiveram os melhores resultados e o sistema baseado em UASB operado isoladamente veio logo em seguida com valores de remoção de matéria orgânica muito próximos.

Tabela 2 - Resultados da avaliação de 166 ETEs em Minas Gerais e São Paulo, segundo Oliveira e Von Sperling (2005).

	Constituinte	Unidade	FS+FA	LF	LAN+LF	LA	UASB	UASB+POS
DBO	Afluente	(mg/L)	665	553	510	315	371	362
	Efluente	(mg/L)	292	136	89	35	98	42
	Eficiência remoção	(%)	59	75	82	85	72	88
DQO	Afluente	(mg/L)	1398	1187	1095	575	715	713
	Efluente	(mg/L)	730	525	309	92	251	141
	Eficiência remoção	(%)	51	55	71	81	59	77
SST	Afluente	(mg/L)	479	430	411	252	289	334
	Efluente	(mg/L)	165	216	153	57	85	51
	Eficiência remoção	(%)	66	48	62	76	67	82

Fonte: Oliveira e von Sperling (2005).

A Tabela 2 mostra que os sistemas UASB apresentam um bom desempenho tanto com o pós-tratamento quanto operando isoladamente. Segundo os mesmo autores, resultados de outros trabalhos, citados na literatura científica, corroboram a melhor eficiência do UASB (Tabela 3).

Tabela 3 - Comparação entre os resultados reais segundo Oliveira e von Sperling (2005) e na literatura, quanto à eficiência de diversos sistemas de tratamento, na remoção de DBO, DQO e SST.

Constituinte	Faixas	FS+FA	LF	LAN+LF	LA	UASB	UASB+POS
DBO (%)	Literatura	80 a 85	75 a 85	75 a 85	85 a 97	60 a 75	75 a 93
	Reais	36 a 82	65 a 84	73 a 88	74 a 96	65 a 79	85 a 92
DQO (%)	Literatura	70 a 80	65 a 80	65 a 80	80 a 93	55 a 70	65 a 90
	Reais	18 a 78	40 a 72	65 a 78	62 a 93	44 a 77	64 a 86
SST (%)	Literatura	80 a 90	70 a 80	70 a 80	87 a 93	65 a 80	70 a 97
	Reais	39 a 86	23 a 69	35 a 78	53 a 95	57 a 81	71 a 92

Fonte: Oliveira e von Sperling (2005).

3.1.2.1 Problemas operacionais comuns em reatores UASB

Existem diversas causas para a ocorrência de variações de eficiência nos sistemas de tratamento de esgoto, que vão desde variações provocadas por atividades da população, até as causadas pela operação e manutenção das unidades de tratamento (LEITÃO *et al.*, 2006). Variações como essas, podem provocar flotação de grânulos, geração de odores e alta concentração de sólidos suspensos no efluente, levando a uma queda na eficiência dos reatores UASB e acarretando o lançamento de efluente com níveis inapropriados de contaminantes nos corpos receptores (CARVALHO *et al.*, 2005).

Ramos (2008) avaliou a influência do descarte de lodo no desempenho de reatores UASB pretendendo determinar uma rotina eficiente de descarte que minimizasse os problemas operacionais. Após o monitoramento de dois reatores UASB submetidos a uma rotina mensal de descarte, foi observado uma melhora na estabilidade dos sistemas.

Outro fator que podem afetar negativamente o processo de digestão anaeróbia é a relação com o substrato. Segundo Meystre (2007), alterações no esgoto afluente ao sistema podem provocar desequilíbrio no processo devido à alta sensibilidade das arqueas metanogênicas. As arqueas deixam de produzir metano, e consequentemente, há o aumento na concentração de ácidos orgânicos voláteis e outros produtos intermediários, causando a queda do pH, e inibindo a produção de biogás.

A fim de verificar o desempenho de reatores anaeróbios do tipo UASB, alguns trabalhos experimentais estudaram diversas situações que pudessem gerar essas variações repentinas e modificar tanto o funcionamento do reator como as

características do efluente tratado (van LIER *et al.*, 1990; PELÁEZ, 2007; LEITÃO *et al.*, 2005; LEITÃO *et al.*, 2006; CARVALHO *et al.*, 2005; VERSIANI *et al.*, 2005).

Segundo van Lier *et al.* (1990) mudanças inesperadas na concentração de matéria orgânica podem afetar negativamente a eficiência de reatores UASB.

Peláez (2007) buscou quantificar os efeitos reais no desempenho dos reatores UASB devido à diluição de carga orgânica e ao aumento da vazão do esgoto. Para a diluição foi feito uma simulação de chuva, e para o aumento da carga orgânica foi feito uma carga de choque para aumentar a quantidade de esgoto que chega ao sistema. Os resultados obtidos foram o desempenho inicial desfavorável do reator quanto à remoção de DQO total e dissolvida, porém, após o fim das perturbações os reatores recuperaram-se atingindo os mesmos níveis de tratamento apresentados antes dos experimentos. Os reatores mantiveram sua capacidade de tamponamento, pois as cargas de choques não provocaram quedas drásticas no pH. Os choques que simularam o evento de chuva, juntamente com o processo de aclimação, afetaram as características físico-químicas e biológicas do lodo dos reatores UASB, diminuindo sua velocidade de sedimentação e tamanho das partículas.

Leitão *et al.* (2006) usaram seis reatores UASB (120L) tratando esgoto doméstico proveniente da cidade de Campina Grande a uma temperatura de 27°C, para avaliar a robustez dos mesmos quanto a exposição a cargas de choque orgânico, com uma concentração cinco vezes maior que a média, e TDH de seis horas. O sistema se mostrou eficiente na remoção de DQO e na manutenção do pH.

Também operando um reator UASB em escala piloto (160L) recebendo esgoto sanitário da Universidade de São Paulo em São Carlos, Carvalho *et al.* (2005) demonstraram que variações diárias de 40% acima ou abaixo em relação à vazão média afluente não influenciam a capacidade de tamponamento do reator nem nas características do efluente tratado.

Versiani *et al.* (2005) avaliaram um reator UASB na Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, submetido a diferentes condições operacionais, Observaram que baixas velocidades ascensionais favoreceram o desempenho da unidade, possivelmente devido a uma maior adsorção e captura de sólidos afluentes na manta de lodo. Por outro lado, velocidades ascensionais elevadas pioraram a eficiência provavelmente devido ao aumento das forças de cisalhamento, desagregando os sólidos capturados.

Leitão *et al.* (2005) buscaram avaliar as propriedades hidrodinâmicas da manta de lodo dos reatores do tipo UASB baseando-se na sedimentabilidade e expansibilidade.

Os autores concluíram que a sedimentabilidade do lodo aumenta e a expansibilidade diminui quando o TDH diminui e/ou a concentração afluenta aumenta e vice-versa.

3.2 Lodo excedente

O lodo biológico é formado a partir de matéria orgânica degradada por microrganismos, principalmente bactérias, arqueas e protozoários, que irão crescer no sistema constituindo a biomassa. Desta forma, a aglomeração da biomassa, juntamente com a matéria orgânica não viva, leva a formação de flocos que irão originar o lodo (SCHWABE *et al.*, 2000). Segundo van Haandel (2008), a maior parte desse lodo é inerte, ou seja, material não biodegradável.

Estudos feitos em diversos países indicaram que o volume de lodo produzido nas ETEs representa cerca de 1-2% do volume de esgoto tratado, entretanto o custo com tratamento e disposição final dos mesmos atinge entre 30-50% de todo o custo operacional das ETEs (FERNANDES, 1999). Na Tabela 4 estão apresentados os valores de lodo produzido por diferentes tipos de tratamento.

Tabela 4 - Produção de lodo para os diferentes tipos de tratamento de esgoto.

Tipo de Tratamento	Quantidade de Lodo Produzida (m³/hab./ano)
Lagoa facultativa primária	0,037
Lagoa facultativa	0,03 - 0,08
Lagoa anaeróbia – lagoa facultativa	0,01 - 0,04
Lagoa aerada facultativa	0,03 - 0,08
Lodos ativados (aeração prolongada)	1,1 - 1,5
Lodos ativados (fluxo intermitente)	0,7 - 1,2
Filtro biológico (baixa carga)	0,7 - 1,5
Filtro biológico (alta carga)	0,4 - 0,6
Biodiscos	1,1 - 1,5
Reatores UASB	0,07 - 0,1
Fossa séptica – filtro anaeróbio	0,07 - 0,1

Fonte: Andreoli, 2009.

Dentre os sistemas de tratamento existentes, os reatores UASB são vantajosos, quanto ao manuseio de lodo biológico, pois a produção de lodo é inferior, quando comparado com sistemas aeróbios (AIYUK *et al.*, 2006). Sendo assim, todos os processos de tratamento de esgoto geram quantidades de lodos que devem ser descartadas. Estas quantidades de lodo que crescem excessivamente, chamadas de lodo excedente, podem vir a prejudicar o processo de tratamento (ROCHA, 2009).

O lodo excedente consiste numa mistura de matéria orgânica e inorgânica que se acumula no sistema e deve ser descartada periodicamente ou continuamente, dependendo do sistema de tratamento, devendo ocorrer em volume e magnitude adequada, para que a sua retirada não interfira na eficiência do sistema (FERNANDES, 1999; LEITÃO *et al.*, 2005).

Segundo Campos (1999), para se obter uma operação adequada nos reatores UASB, deve-se determinar a melhor rotina de descarte de lodo, ou seja, deve-se buscar a frequência ideal para os descartes de modo que a perda de sólidos não interfira na qualidade do efluente quanto os parâmetros DQO, DBO e SST.

Cavalcanti *et al.* (1999) concluíram que para se reduzir os custos operacionais, em sistemas UASB, seriam indicados poucos descartes com grandes volumes de lodo ao invés de muitos descartes com pouco volume. Porém, essa prática afeta o desempenho do reator, gerando baixa eficiência no tratamento, produzindo um efluente tratado de menor qualidade.

Depois de retirado dos sistemas de tratamento, o lodo excedente deve passar por processos de tratamento, para tanto, Jordão e Pessoa (2005) sugerem os seguintes procedimentos: adensamento, estabilização e desaguamento. O Adensamento consiste na redução do volume pela perda de umidade, a estabilização tem a finalidade de reduzir a concentração de sólidos voláteis e o desaguamento tem como objetivo reduzir o volume total de lodo a ser transportado até sua destinação final.

Alves (2006) avaliou lodos oriundos de sistemas de tratamento com altos e baixos TRC. Concluiu que em sistemas com TRC acima de 5 anos o lodo excedente apresenta baixos valores de sólidos voláteis e que, portanto, o mesmo só precisa passar por processo de desaguamento antes do descarte final. O mesmo pode ser dito com respeito aos reatores do tipo UASB, onde o TRC é bem superior ao TDH, de modo que o lodo excedente também já sai estabilizado (com baixa concentração de sólidos voláteis) (ROCHA, 2009). Os leitos de secagem consistem na técnica mais usual para promoção do desaguamento devido ao baixo custo e facilidade operacional.

O aterro sanitário não é a única destinação final para os lodos excedentes. Schwabe *et al.* (2000) identificaram algumas soluções recomendadas para destinação final dos lodos após o seu devido tratamento:

- Incineração;
- Produção de material combustível;
- Produção de tijolos;

- Fabricação de cimento.
- Aterro sanitário;

Segundo Fernandes (1999) o lodo excedente não deve ser considerado apenas como um simples resíduo, pois apresenta características que o tornam um excelente condicionador do solo, podendo auxiliar na melhoria das práticas agrícolas. Ainda, para o uso agrícola deve ser considerado que os lodos biológicos provenientes de sistemas anaeróbios apresentam menores concentrações de nutrientes comparados aos lodos aeróbios (FERREIRA *et al.*, 1999).

3.3 Sedimentabilidade da Manta de Lodo

O estudo da sedimentabilidade do lodo em sistemas UASB é fundamental para garantir a qualidade do efluente tratado, já que o desempenho do sistema está diretamente relacionados à presença de sólidos no efluente final. Porém, ainda não há conhecimento consistente quanto às propriedades de sedimentação dos lodos anaeróbios (MAGALHÃES *et al.*, 2005).

Segundo Jin *et al.* (2003), sedimentação e compactação do lodo são dois aspectos fundamentais para o desempenho e a eficiência dos processos de tratamento em sistemas UASB. A sedimentação do lodo ocorre com as partículas se depositando no fundo do reator, formando uma manta de lodo, que gradualmente se consolida pelo peso dos sólidos acumulados, e apenas, deslocada para cima através do fluxo do efluente pelos poros da manta de lodo.

Segundo Poinapen *et al.* (2009), o sucesso do reator UASB depende das propriedades de sedimentação e de estabilidade da manta de lodo, quanto maior a sedimentabilidade maior será a retenção de células (biomassa) no sistema. Estas características são importantes para assegurar a estabilidade do processo em altas taxas de carregamento de substrato, maximizando assim o desempenho do sistema.

A Biomassa que se desenvolve no interior dos reatores influencia diretamente na capacidade de sedimentação do lodo. Juntamente com o separador trifásico, o processo de granulação ou floculação da biomassa também é responsável por reter os sólidos no interior do reator UASB (LEITÃO, 2004).

Outras características singulares dos reatores UASB, que estão diretamente relacionadas com a sedimentação da manta de lodo, são a granulação dispersa no interior do reator, ou seja, formação de grânulos sem meio suporte para aderência, e a ausência de um mecanismo de mistura (a mesma ocorre devido ao fluxo ascendente do

efluente, bem como pela turbulência causada pelas bolhas de gases produzidos no sistema) (BRITO *et al.*, 1996).

A granulação é um processo de agregação de células que tem como consequência a formação de grânulos, o que garante que a biomassa ativa fique retida adequadamente nos sistemas UASB (O'FLAHERTY *et al.*, 1997).

Jia *et al.* (1996) acreditam que a formação de lodo floculento e granular está diretamente relacionado com a presença de polímeros extracelulares. Trabalhando com sistemas operados com baixa carga orgânica observou-se baixa produção de polímeros, o que levou a formação de um lodo floculento pouco sedimentável.

López *et al.* (1999) testando acetato, lactato e glicose, verificaram que mudanças na fonte de carbono influenciam no processo de sedimentação do lodo em sistemas UASB.

Segundo Jin *et al.* (2003) existem dois fatores decisivos para formação de lodo com pouca sedimentabilidade:

- Aumento da manta de lodo por causa da proliferação de bactérias filamentosas. As bactérias filamentosas atuam como pontes entre diferentes agregados, mantendo os grânulos com um maior número de bactérias, conduzindo a formação de grânulos mais compactos. Porém, surgem, na formação do grânulo, espaços porosos, que podem desintegrar o grânulo. Esse lodo que se desintegra flutua e é lavado para fora do sistema ou permanece contribuindo para formação de espuma (LI *et al.* 2008).
- Produção de flocos pequenos e leves, chamados de flocos pobres ou finos. A produção de flocos pobres e finos interfere na sedimentação, diminuindo assim, progressivamente a taxa de sedimentação (RICHARDSON e ZAKI, 1997).

Wanner e Gujer (1984) sugeriram que o crescimento da manta de lodo que fica suspensa no sistema, é geralmente esparsa com elevado volume por unidade de biomassa e microrganismos filamentosos, que podem causar a formação de espuma. No entanto, Droste (1997) diz que a natureza da manta de lodo produzida, consiste em partículas, que geralmente são mais densas e, em muitos casos evitam problemas de volume e de formação de espuma.

O IVL (índice volumétrico do lodo) é atualmente a única análise realizada para estudo de sedimentabilidade da manta de lodo de sistemas UASB. Introduzido por Mohlman, em 1934, o IVL consiste no volume de lodo dividido pela massa do lodo

depois de 30 minutos de sedimentação em uma proveta. O volume ocupado pelo lodo após este período depende da taxa de sedimentação inicial e das características de concentração do lodo. Este índice foi originalmente destinado a ser utilizado na operação de ETEs, como meio para o monitoramento das condições físicas em lodo ativados. No entanto, devido a sua simplicidade, tem sido aplicados para o monitoramento de outros sistemas de tratamento (DICK e VESILIND, 1969). Quanto maior for o IVL, pior é a sedimentabilidade do lodo, afirmação fundamentada no trabalho de Jin *et al.* (2003), que verificou que a sedimentabilidade foi extremamente baixa para valores de IVL superiores a 150 ml/g.

Porém, o uso do IVL para o estudo de sedimentabilidade é controverso. Segundo vários autores (DICK e VESILIND, 1969; JIN *et al.*, 2003; LEITÃO, 2004) esse parâmetro não apresenta boa correlação com as características de sedimentabilidade dos lodos anaeróbios. Segundo esses mesmos autores o procedimento mais correto para esta análise seria o desenvolvido por Vesilind (1968) que consiste na relação entre a velocidade de sedimentação dos sólidos (VSS) e a concentração do lodo. Esse método gera dois parâmetros empíricos, chamados de “k” e “ $U_{s,0}$ ” que possibilitam uma melhor análise da hidrodinâmica dos grânulos no lodo anaeróbio.

Segundo Leitão *et al.* (2004), o IVL é uma metodologia que não apresenta resultados favoráveis para lodos anaeróbios pois é um teste dependente da concentração da manta de lodo.

Ekama *et al.*, (1984), estudando a sedimentabilidade de lodos anaeróbios, concluíram que a velocidade de sedimentação dos grânulos diminui à medida que aumenta a concentração de lodo. A taxa de sedimentação é controlada pela corrente líquida que passa através da manta de lodo, e está inversamente relacionada com a concentração. Sendo assim, quanto maior a velocidade de sedimentação, menor será a concentração do lodo.

As velocidades ascensionais influenciam diretamente na sedimentação da manta de lodo, pois em velocidades elevadas há o aumento da força de cisalhamento, possibilitando a desagregação dos sólidos capturados, e consequentemente redução da capacidade de sedimentação e de permanência dos grânulos na manta de lodo. Em velocidades baixas há o aumento da colisão entre os sólidos suspensos afluentes e a manta de lodo, permitindo a adsorção e a captura dos mesmos e, também, a separação das bolhas de gases formadas na superfície da biomassa ocorrem mais facilmente (MAHMOUND *et al.*, 2003).

A sedimentabilidade da manta de lodo em reatores UASB ainda não foi muito estudada. O mesmo acontece para estudos com lodos anaeróbios em geral. Além dos autores citados acima, atualmente existem apenas metodologias para o estudo de sedimentabilidade em reatores de leito expandido granular (EGSB) e reatores de leito fluidizado (FBR) (MARTIN et al, 1999; MARTIN, 2001).

4 MATERIAL E MÉTODOS

A experimentação dessa pesquisa refere-se à unidade experimental de sedimentação (UES). Os lodos de diferentes ETEs foram analisados físico-quimicamente e testados na UES. 19 amostras de lodo foram coletadas, sendo 18 amostras de reatores UASB da CAGECE (de ETEs da região metropolitana da cidade de Fortaleza e interior do estado do Ceará) tratando esgoto doméstico e 01 amostra de reator UASB tratando efluente industrial (Empresa Heineken-Pacatuba).

Após os testes na UES, os dados obtidos foram modelados e tabelados de acordo com os métodos de Vesilind para a sedimentabilidade e Richardson e Zaki para a expansibilidade. A esquematização geral dos testes na UES pode ser visualizada na Figura 4.

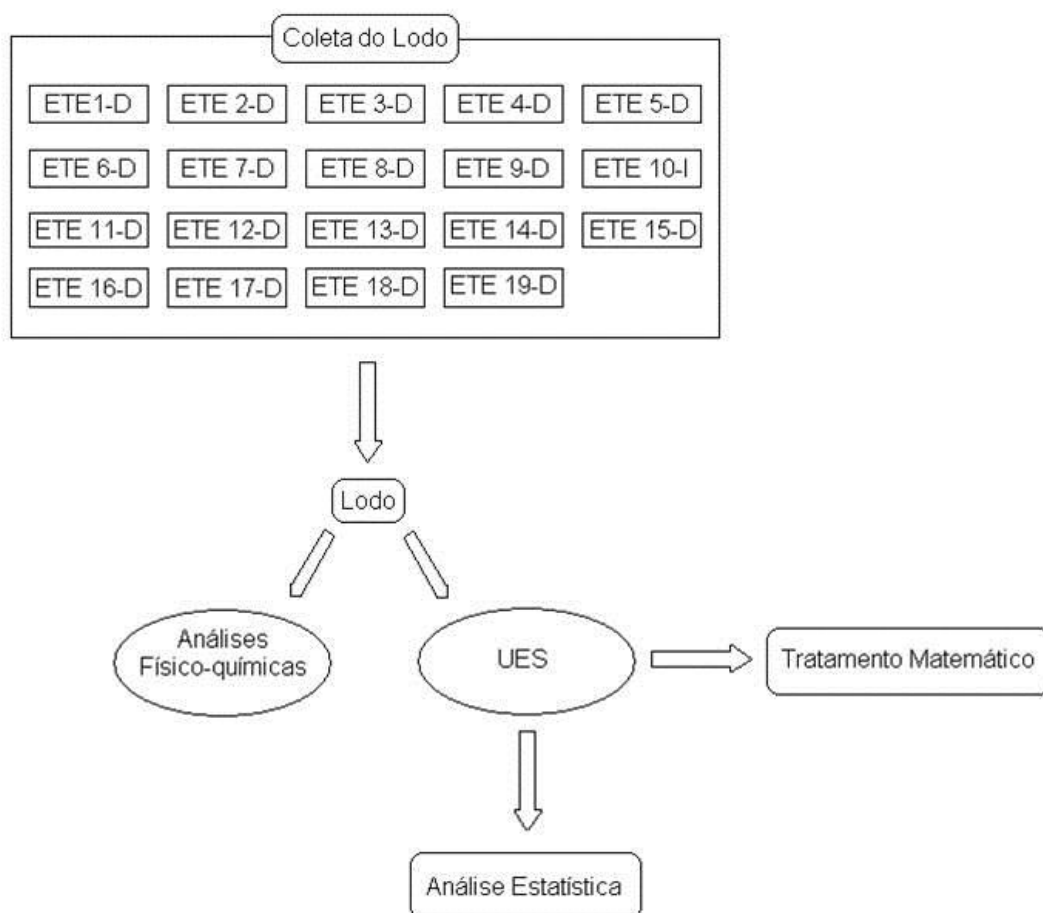


Figura 4 - Organograma representativo das fases da pesquisa.

4.1 Coleta das Amostras de Lodo

Os lodos das ETEs localizadas na região metropolitana da cidade de Fortaleza (Fortaleza, Pajuçara, Pacatuba e Maranguape) foram coletados amostras compostas dos lodos e testados no mesmo dia. Para as amostras de lodo das ETEs do interior do estado (Cascavel, Baturité, Aratuba e Guaramiranga) foi providenciado armazenamento em geladeira (4°C). Os lodos armazenados em geladeira nunca permaneceram mais de uma semana sem serem testados.

Ao longo do trabalho foram testados 19 lodos, dentre esses, 18 de estações tratando esgoto doméstico e 1 tratando esgoto industrial, como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - ETEs abordadas na pesquisa, seus tipos de tratamento, localidade e mês em que foi realizado o ensaio.

ETE	Código	Tipo de tratamento	Localidade/sede	Data da coleta
ETE-Aracapé	ETE 1-D	Doméstico	Fortaleza	Outubro/2011
ETE-Novo Barroso	ETE 2-D	Doméstico	Fortaleza	Novembro/2011
ETE-Riacho Doce	ETE 3-D	Doméstico	Fortaleza	Novembro/2011
ETE-Curió I	ETE 4-D	Doméstico	Fortaleza	Novembro/2011
ETE-Paupina	ETE 5-D	Doméstico	Fortaleza	Dezembro/2011
ETE-Zeza do Tijolo	ETE 6-D	Doméstico	Fortaleza	Dezembro/2011
ETE-Pajuçara	ETE 7-D	Doméstico	Pajuçara	Janeiro/2012
ETE-Sítio Santana	ETE 8-D	Doméstico	Fortaleza	Janeiro/2012
ETE-Curió II	ETE 9-D	Doméstico	Fortaleza	Fevereiro/2012
ETE-Heineken	ETE 10-I	Industrial	Pacatuba	Fevereiro/2012
ETE-São Francisco	ETE 11-D	Doméstico	Baturité	Fevereiro/2012
ETE-Pôr-do-Sol	ETE 12-D	Doméstico	Fortaleza	Fevereiro/2012
ETE-Guaramiranga	ETE 13-D	Doméstico	Guaramiranga	Fevereiro/2012
ETE-Aratuba	ETE 14-D	Doméstico	Aratuba	Março/2012
ETE-Mulungu	ETE 15-D	Doméstico	Mulungu	Março/2012
ETE-Cascavel	ETE 16-D	Doméstico	Cascavel	Março/2012
ETE-Rosalina	ETE 17-D	Doméstico	Fortaleza	Março/2012
ETE-Dakota	ETE 18-D	Doméstico	Maranguape	Março/2012
ETE-Pedro Câmara	ETE 19-D	Doméstico	Maranguape	Março/2012

4.2 Análises Físico-Químicas

As análises físico-químicas realizadas dos lodos das ETEs estão identificadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Análises Físico-químicas do lodo das ETEs.

Análises dos lodos	Princípio
Sólidos Totais	Método Gravimétrico
Sólidos Totais Voláteis	Método Gravimétrico
Sólidos Totais Fixos	Método Gravimétrico

As análises dos lodos foram realizadas nos laboratórios do IFCE (LTQ, LQA e Saneamento). Todas essas determinações foram realizadas de acordo com APHA (1995).

O IVL foi determinado baseando-se na metodologia desenvolvida por Mohlman (1934), que consiste no volume de lodo dividido pela massa do lodo depois de 30 minutos de sedimentação em uma proveta.

4.3 Unidade Experimental de Sedimentação (UES)

A unidade experimental de sedimentação (UES) foi projetada para estudar em escala de laboratório comportamento hidráulico dos lodos. As duas unidades utilizadas foram construídas em material transparente (acrílico), a fim de ser possível a visibilidade da variação de tamanho da manta de lodo em função das mudanças de velocidades ascensionais testadas. As dimensões das UES foram de: 1m de altura útil, 0,1m de diâmetro e 8L de volume (Figura 5).

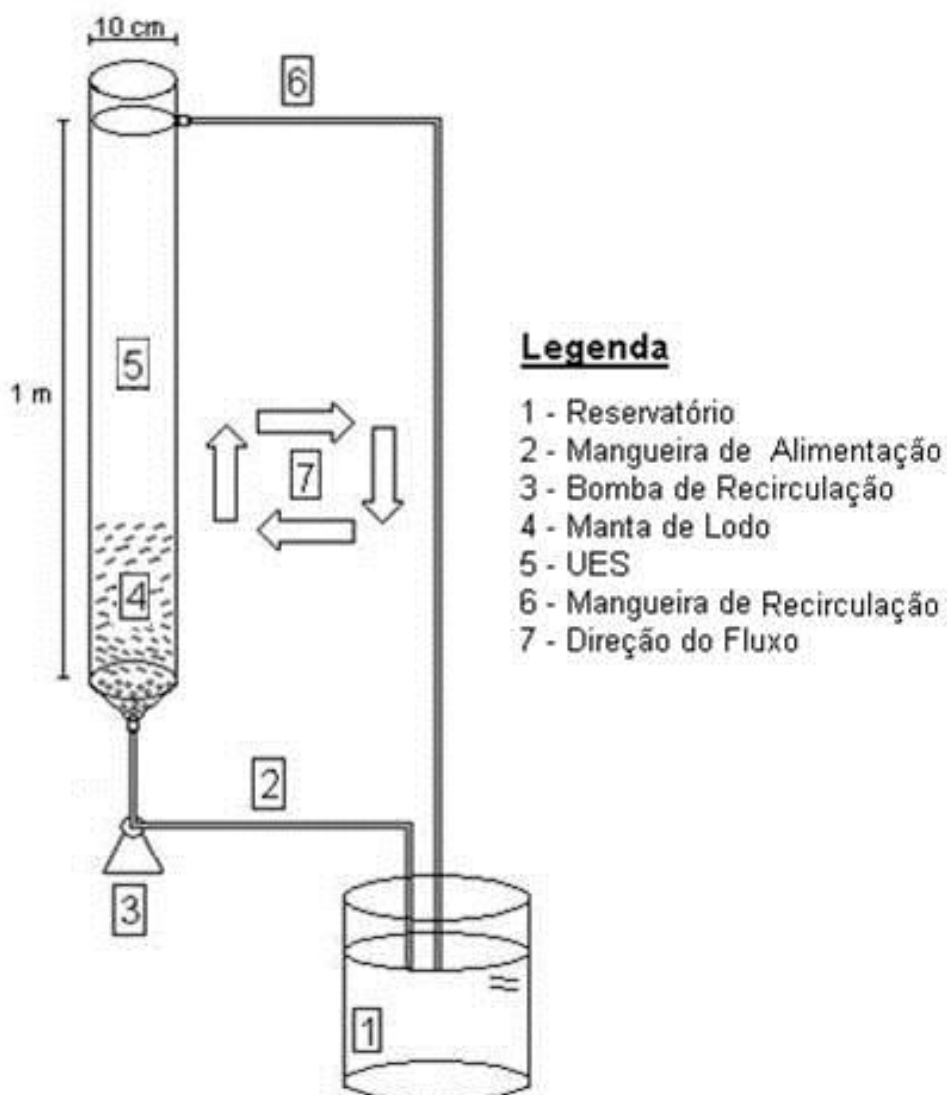


Figura 5 - Representação esquematizada do ensaio realizado na UES.

Na Figura 5 estão enumerados os componentes que formam o ensaio na UES. No reservatório está o efluente (1) que é levado pela mangueira de alimentação (2), através da força da bomba (3), em fluxo ascendente, de forma que o efluente ultrapassa a manta de lodo (4) dentro da UES (5), e sai do sistema pela mangueira de recirculação (6), retornando ao reservatório.

O sistema completo com as duas UES e os reservatórios pode ser visualizado na Figura 6.



Figura 6 – Unidade Experimental de Sedimentação (UES) em atividade.

Todos os ensaios foram iniciados colocando-se 1L de lodo em cada uma das UES (ensaios em duplicata). Os reservatórios foram preenchidos com esgoto doméstico pré-gradeado proveniente da EPC-CAGECE. Pedras, com diâmetro aproximado de 2cm, foram colocadas dentro das UES para se evitar os caminhos preferenciais e a formação de fenômeno de pistonamento na manta de lodo, como recomendado por Dick e Vesilind (1969).

Após a introdução dos lodos, a bomba foi ligada numa vazão elevada, para que o esgoto contido nos reservatórios pudesse preencher as UES. Posteriormente, a bomba era desligada, por aproximadamente 1 hora, para que a manta de lodo sedimentasse. Após atingida a estabilidade da manta de lodo, a bomba era religada na velocidade ascensional padrão de cada ensaio.

Os ensaios foram feitos com quatro velocidades ascensionais diferentes: 0,56m/h; 0,75m/h; 1,125m/h e 2,25m/h. Cada ensaio consistiu na adoção de uma velocidade ascensional padrão e a partir desta os valores eram variados (aumentados e/ou diminuídos). Sempre antes de se testar uma nova velocidade, a UES tinha a velocidade padrão do ensaio restaurada. A altura da manta de lodo nas UES, que

mudava em função das velocidades ascensionais, foi sempre medida em intervalos de 5 min a partir do início do ensaio, num total de 60 min.

4.4 Tratamento Matemático

4.4.1 Sedimentabilidade do lodo

O tratamento matemático dos dados para a sedimentabilidade do lodo foi realizado tendo por base a metodologia desenvolvida por Vesilind (1968) e adaptado por Leitão (2011).

A primeira variável calculada foi a concentração da manta de lodo, segundo a Equação 1.

$$X = \frac{X_0 \times V_0}{A \times h} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde X é a concentração da manta de lodo para uma dada altura da manta (g/L); X_0 é a concentração do lodo na amostra composta utilizada no experimento (g/L); V_0 é o volume de lodo usado no experimento (l); “A” é a área da secção transversal da UES ($0,785 \text{ dm}^2$) e “h” (dm) é a altura do leito do lodo para uma dada velocidade ascensional.

Após o cálculo da concentração da manta de lodo foram calculados os parâmetros da equação linear (Equação 2), através do método dos mínimos quadrados (Equações 3 e 4).

$$\ln(U) = k \cdot X + a \quad (\text{Eq. 2})$$

$$U = U_0 \cdot e^{(k \cdot X)} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$U_0 = e^a \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde U é a velocidade ascensional empregada (m/h); X é a concentração da manta de lodo (g/L) o U_0 (m/h) e k (L/g) são os parâmetros empíricos de Vesilind e a é uma constante empírica.

4.4.2 Expansibilidade do lodo

A expansão da manta de lodo (ϵ) foi calculada usando a Equação 5, sendo modelada segundo a metodologia desenvolvida por Richardson e Zaki (1954) e adaptado por Leitão (2011). Através do método dos mínimos quadrados, os parâmetros da equação linear (Equação 6) podem ser obtidos (Equações 7 e 8).

$$\mathfrak{E} = \frac{h - h_0}{h_0} \times 100 \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\text{Log}(U) = m \cdot \text{Log}(\mathfrak{E}) + b \quad (\text{Eq. 7})$$

$$U = U_0 \times (\mathfrak{E})^m \quad (\text{Eq. 8})$$

$$U_0 = 10^b \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde $\mathfrak{E}$ é a expansão da manta de lodo (%); h (m) é a altura estabilizada da manta de lodo para uma determinada velocidade ascensional U (m/h); h_0 (m) é a altura da manta de lodo quando a velocidade ascensional é zero; U é a velocidade ascensional empregada (m/h) e m (L/g) e b são as constantes de expansibilidade.

4.5 Tratamento Estatístico

A análise da variável resposta (altura da manta de lodo) foi realizada por meio do cálculo de medidas descritivas e apresentação gráfica, cujo estudo foi composto por 684 observações. A análise de variância foi realizada considerando o delineamento experimental inteiramente casualizado em parcelas sub-divididas. Sendo que as estações de tratamento foram alocadas nas parcelas, as velocidades padrões nas sub-parcelas e as velocidades variadas alocadas nas sub-sub-parcelas.

O modelo no qual os dados se ajustaram foi à distribuição *Normal Inversa* com *função de ligação logarítmica*, dado por:

$$f(y_i | \mu_i, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2 y_i^3}} \exp \left\{ -\frac{(y_i - \mu_i)^2}{2\mu_i^2 \sigma^2 y_i} \right\}, \quad y_i > 0 \quad (\text{Eq. 10})$$

Em seguida, foi feito o quadro da análise de desvio, *ANODEV* (CORDEIRO; DEMÉTRIO, 2008), que é uma generalização da análise de variância para os MLG's. No quadro é apresentado o p-valor do teste t e, com este valor, pode-se verificar se a estação de tratamento, velocidade padrão, velocidade variada e/ou a interação entre estes possuía efeito significativo sobre a altura da manta do lodo.

O teste de *Kruskal-Wallis* (SIEGEL, 1975) também foi utilizado. O emprego deste teste teve a finalidade de verificar se pelo menos uma média, entre os tipos de estação de tratamento, entre velocidade padrão e variações de velocidade, diferiu das demais.

Para todos os testes utilizou-se o nível de significância $\alpha=5\%$. Portanto, houve indicação de significância quando o nível descritivo do teste foi menor que o nível de significância, ou seja, com $p\text{-valor} < 0,05$. Em tempo, $p\text{-valor}$ é definido como a probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou maior quanto àquela observada na amostra, assumindo verdadeira a hipótese nula.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Unidade Experimental de Sedimentação (UES)

Nas Figuras 7 estão apresentados todos os ensaios realizados nas ETEs que fizeram parte desse trabalho. Os ensaios estão representados por barras de cores diferentes, onde a primeira cor (azul claro) representa a velocidade ascensional nula, pois, nesse momento a bomba foi desligada. Para essa situação, os lodos obtiveram comportamentos semelhantes, variando a altura da manta de lodo de 5 a 14cm.

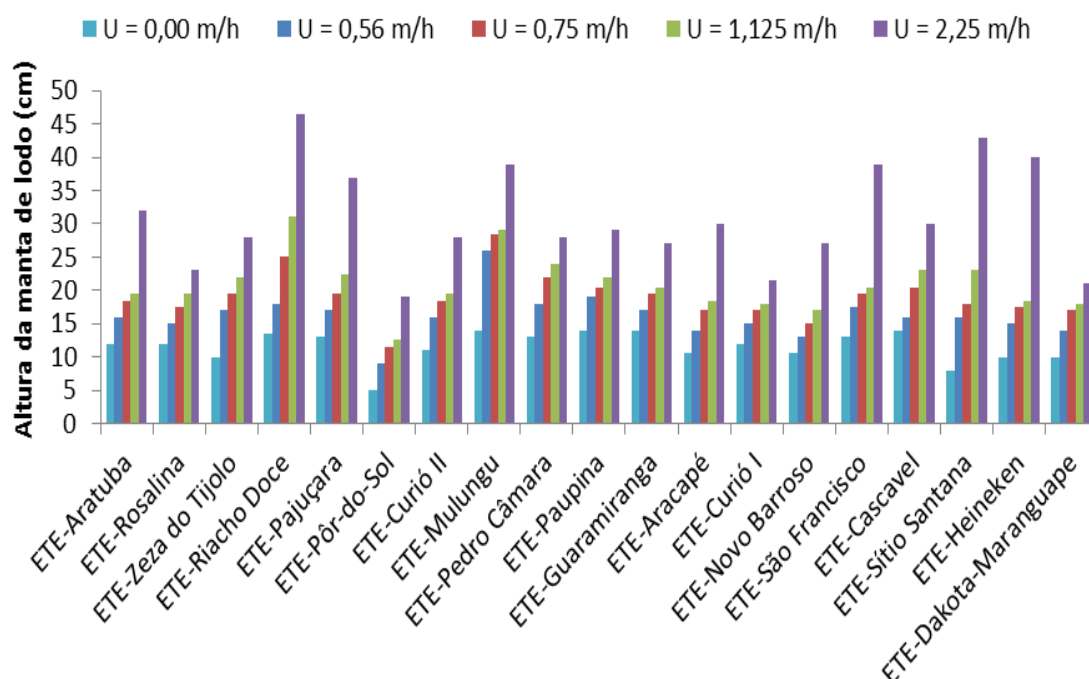


Figura 7 - Representação das alturas das mantas de lodo alcançadas nos diferentes ensaios e as respectivas ETEs de onde foram coletadas.

Na segunda coluna, representada pela velocidade ascensional de 0,56m/h (azul escuro) foram registradas valores da altura da manta de lodo ainda pequenos, semelhantes aos referentes à velocidade ascensional nula, variando de 9 a 26cm.

Na terceira coluna foi representada a velocidade de 0,75m/h (vermelha). Para esta velocidade foram observadas alturas da manta de lodo variando de 11,5 a 28,5cm.

Na quarta coluna foi representada a velocidade de 1,125m/h (verde). Para esta velocidade foram observadas alturas da manta de lodo variando de 12,5 a 31cm.

Finalmente, na quinta coluna foi representada a velocidade de 2,25m/h (lilás). Para esta velocidade observaram-se as maiores alturas da manta de lodo em todos os

diferentes ensaios, as quais variaram de 19 a 46,5cm. Portanto, pode-se observar, que quanto maior foi a velocidade ascensional, maior foi a altura da mata de lodo.

A variação das alturas das mantas de lodo, para a mesma velocidade ascensional, permite constatar que outros fatores, como granulação, podem estar interferindo na sedimentabilidade. Porém, é importante ressaltar que para as velocidades ascensionais de 0,56 e 0,75m/h, as alturas alcançadas, pelas mantas de lodo, apresentaram intervalos de variação com valores muito próximos em quase todas as estações estudadas. Estas velocidades correspondem a valores de TDH de 8 e 6 horas, respectivamente, e são um forte indício de um comportamento padrão que pode auxiliar operadores quanto ao momento ideal para descarte do lodo excedente.

5.1.1 ETEs abordadas na pesquisa

Sedimentabilidade

O ensaio foi dividido em quatro etapas, para isso em cada etapa foi utilizada uma velocidade ascensional padrão, e a partir desta houve acréscimos e decréscimos que permitiram o estudo das diferentes variações de altura da manta de lodo na UES. Na Figura 8 a 26, observa-se a primeira etapa com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h e as variações de velocidade, acima e abaixo deste valor, que tiveram como consequência diferentes alturas da manta de lodo. A velocidade menor de 0,45m/h resultou em uma manta de lodo compacta, enquanto que as velocidades maiores, de 0,75; 1,125 e 2,25m/h resultaram em uma manta de lodo expandida.

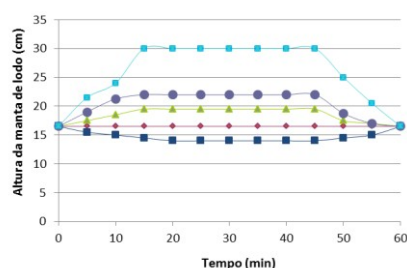


Figura 8 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Aracapé com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

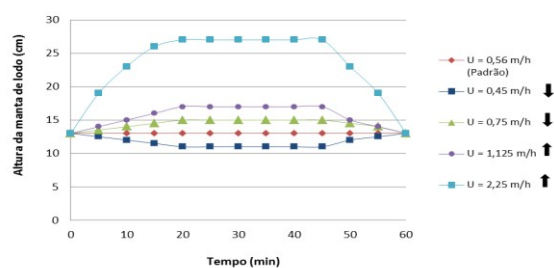


Figura 9 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Novo Barroso com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

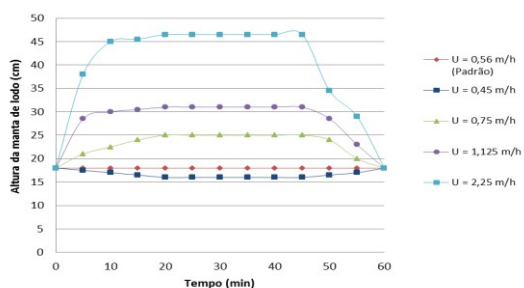


Figura 10 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Riacho Doce com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

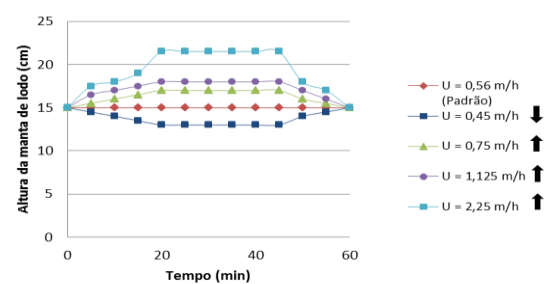


Figura 11 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Curió I com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

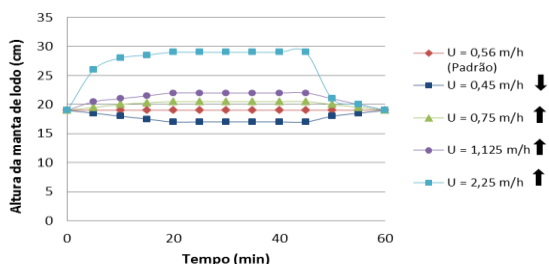


Figura 12 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Paupina com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

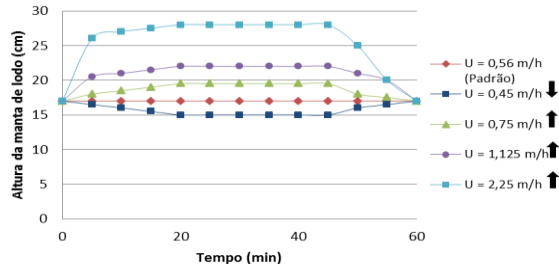


Figura 13 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Zeza do Tijolo com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

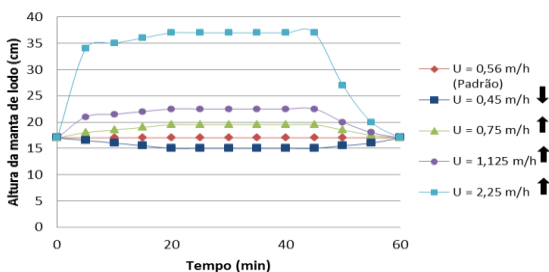


Figura 14 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Pajuçara com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

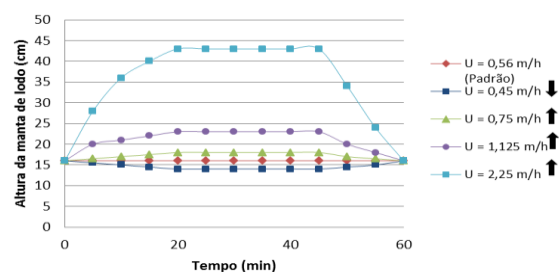


Figura 15 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Sítio Santana com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

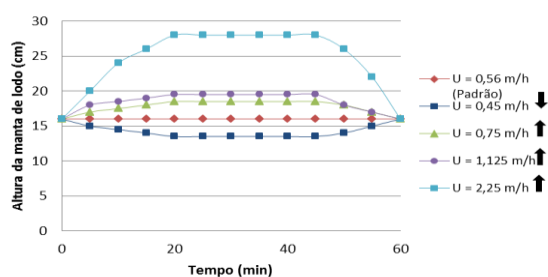


Figura 16 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Curió II com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

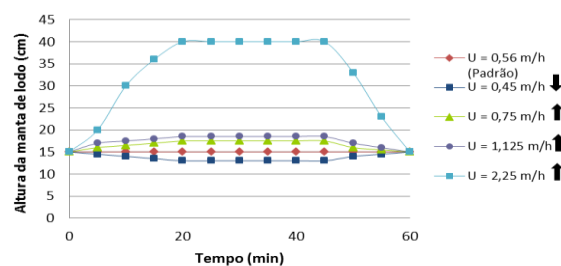


Figura 17 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Heineken com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

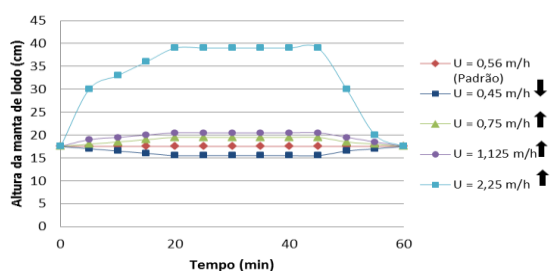


Figura 18 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-São Francisco com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

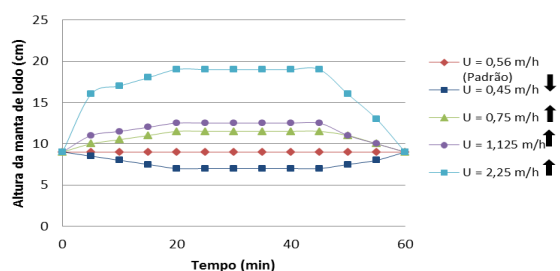


Figura 19 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Pôr-do-Sol com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

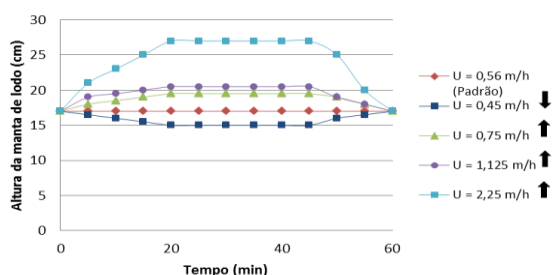


Figura 20 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Guaramiranga com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

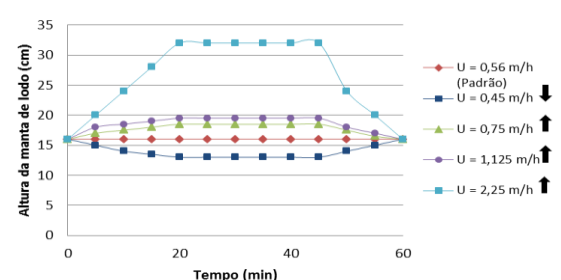


Figura 21 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Aratuba com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

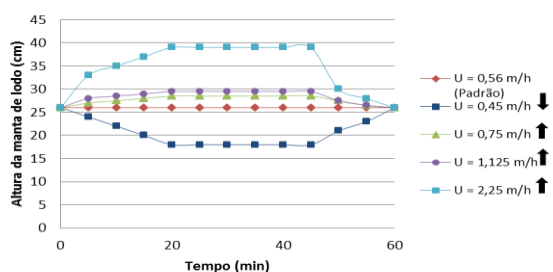


Figura 22 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Mulungu com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

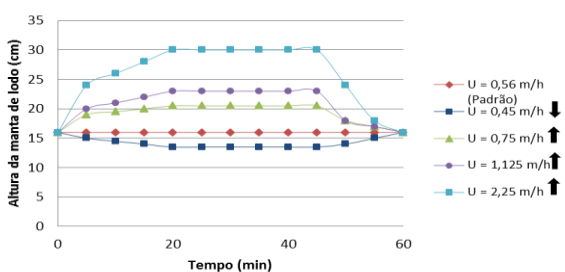


Figura 23 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Cascavel com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

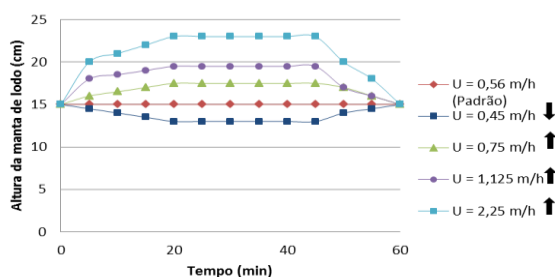


Figura 24 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Rosalina com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

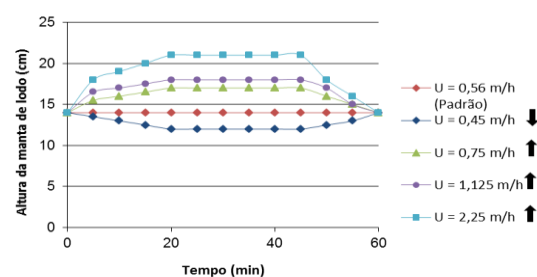


Figura 25 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Dakota com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

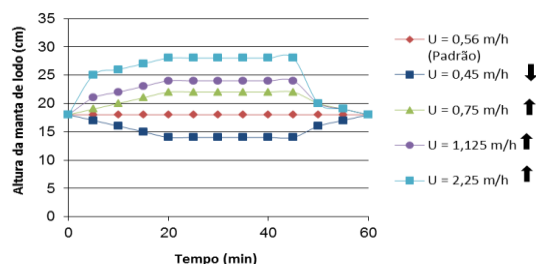


Figura 26 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Pedro Câmara com velocidade ascensional padrão de 0,56m/h (primeira etapa).

As outras velocidades ascensionais padrões de cada ensaio foram, respectivamente: 0,75m/h; 1,125m/h; e, 2,25m/h (gráficos nos anexos). As variações das velocidades em relação às velocidades padrões foram feitas para mais e para menos, como no primeiro ensaio. Nesses ensaios também foi verificada a mesma tendência do primeiro ensaio, assim como para todas ETEs abordadas nessa pesquisa; ou seja, o aumento de U resulta em uma manta de lodo menos sedimentável e menos compacta.

Considerando alturas constantes como condições de equilíbrio, as velocidades ascensionais aplicadas (U) são iguais às velocidades de sedimentação dos flocos (V_{SS}). Portanto, quanto maior é a altura da manta, maior é a velocidade de sedimentação e menor a concentração da manta de lodo (X). Desde que o volume da manta de lodo é proporcional à altura da mesma, há diferentes volumes para cada velocidade ascensional, bem como diferentes concentrações de lodo. Esta relação inversa entre os valores de V_{SS} e X , também pode ser explicada por processo de seleção dos flocos, onde os flocos mais volumosos e leves foram lavados do sistema e os flocos de melhor sedimentação permaneceram. A relação entre a velocidade ascensional e a concentração da manta de lodo pode ser melhor observada na Figura 27 a 45.

Assim, mudanças operacionais (variações de U) forçam o sistema a buscar novas situações de equilíbrio (novas alturas da manta de lodo). No caso da diminuição do TDH (aumento de U), verificou-se aumento da velocidade de sedimentação, já que os flocos não foram lavados para fora do sistema. Portanto, o aumento de U resulta em uma manta de lodo de melhor sedimentabilidade.

Ainda, o aumento na velocidade ascensional resulta em mantas de lodo menos concentradas ou mais diluídas (Figura 27 a 45). Porém, como essa diminuição na concentração tende a formar uma curva, assim pode-se afirmar que essa diluição aumenta em uma proporção menor, conforme é aumentada a velocidade ascensional na UES, o que também é resultado do aumento da sedimentabilidade. Fica evidente que, esse comportamento também está associado ao processo de seleção dos flocos.

Resultados semelhantes foram obtidos por Ekama *et al.*, (1984) que afirmaram, em seu trabalho com lodo anaeróbio, que a velocidade de sedimentação dos grânulos diminui à medida que aumenta a concentração de lodo (X). Segundo os autores, a taxa de sedimentação é controlada pela corrente de água que passa através da manta de lodo, e está inversamente relacionada com a concentração. Sendo assim, quanto maior a velocidade de sedimentação, menor será a concentração do lodo.

Nas Figuras de 27 a 45 está a representação dos quatro ensaios e os seus respectivos valores de concentração da manta de lodo, com as médias desses valores das ETEs, com o desvio padrão de 5%. Os pontos se apresentam sobrepostos, formando apenas uma curva, indicando o método utilizado como confiável.

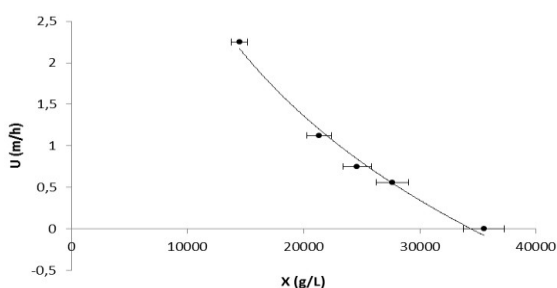


Figura 27 – Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Aracapé.

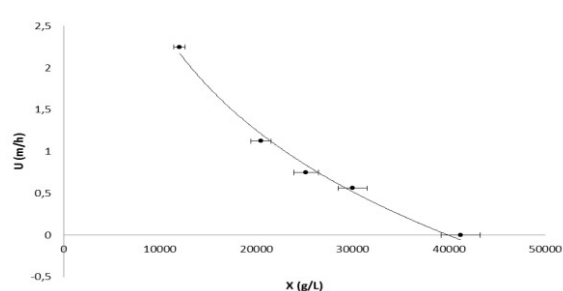


Figura 28 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Novo Barroso.

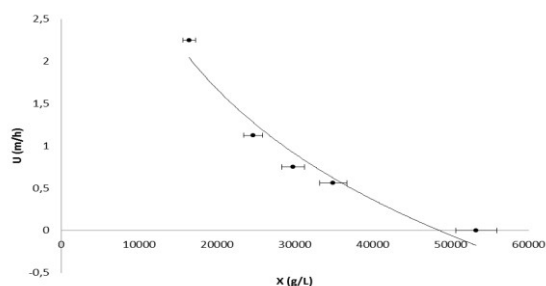


Figura 29 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Riacho Doce.

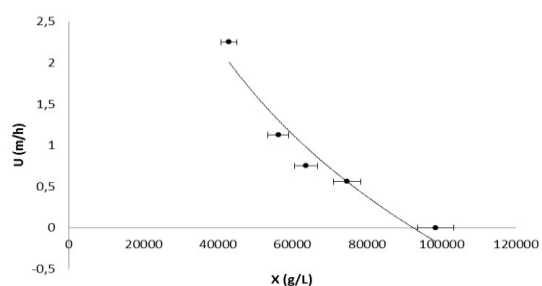


Figura 30 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Curió I.

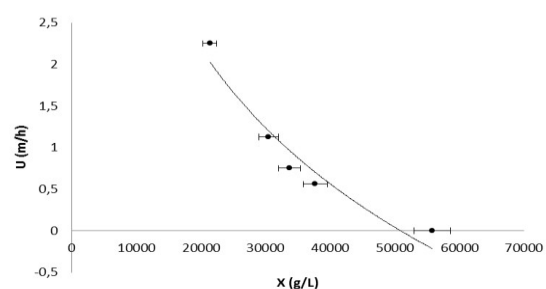


Figura 31 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Paupina.

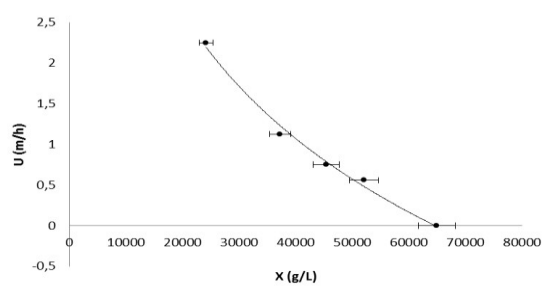


Figura 32 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Zeza do Tijolo.

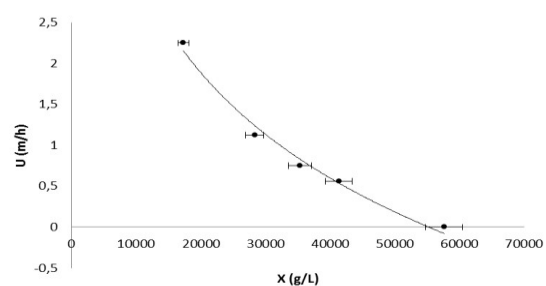


Figura 33 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Pajuçara.

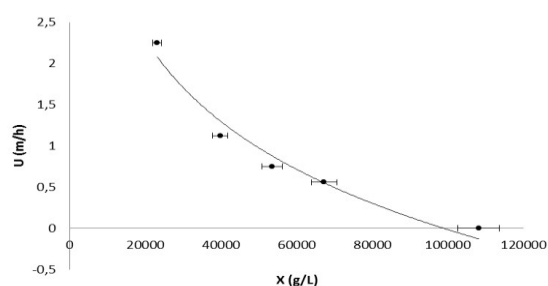


Figura 34 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Sítio Santana.

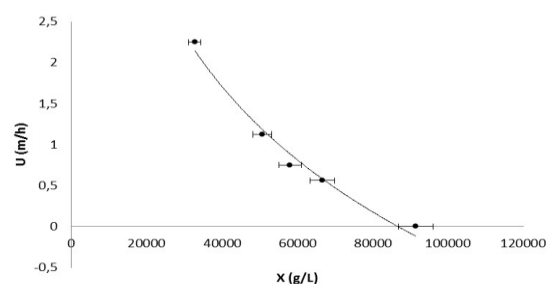


Figura 35 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Curió II.

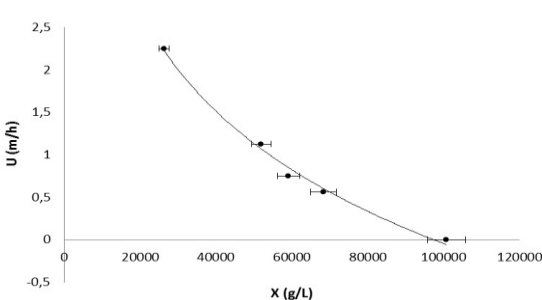


Figura 36 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Heineken.

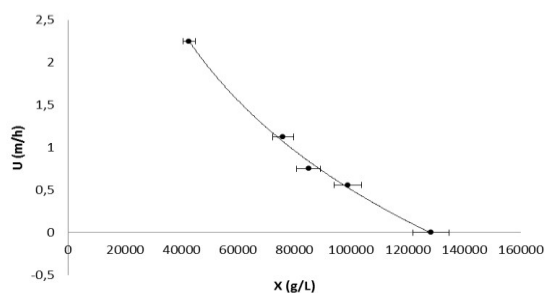


Figura 37 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-São Francisco.

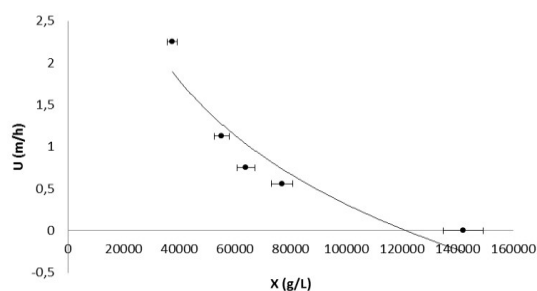


Figura 38 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Pôr-do-Sol.

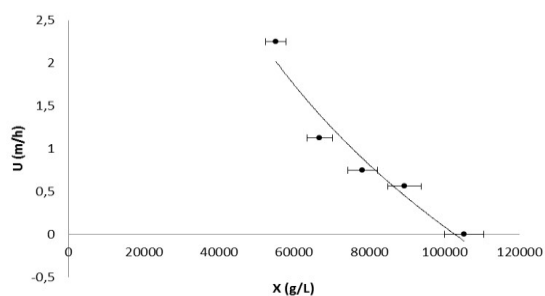


Figura 39 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Guaramiranga.

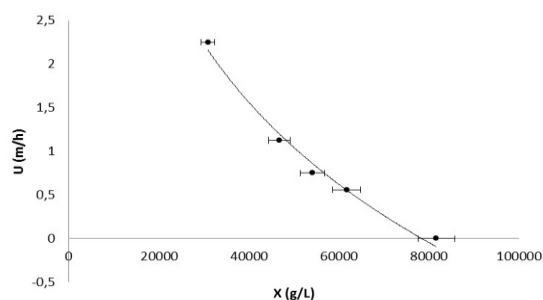


Figura 40 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Aratuba.

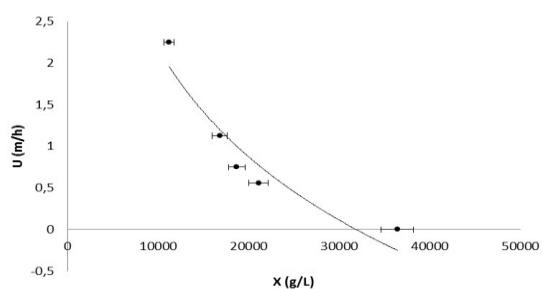


Figura 41 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Mulungu.

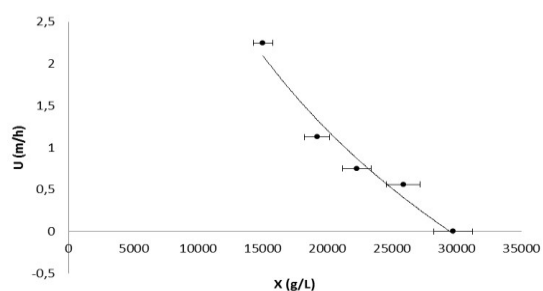


Figura 42 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Cascavel.

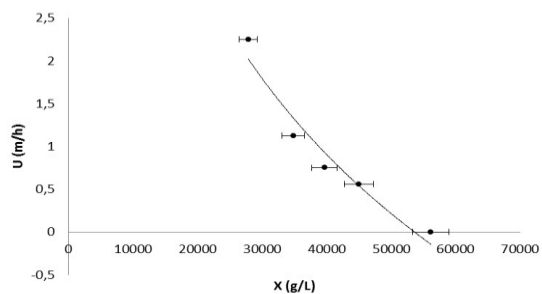


Figura 43 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Rosalina.

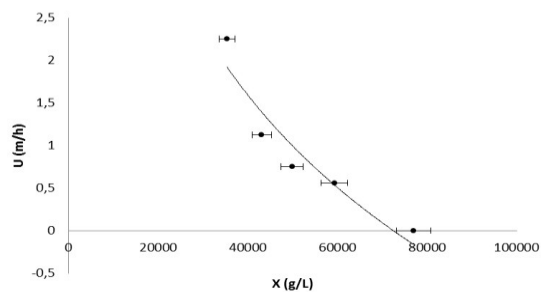


Figura 44 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Dakota-Maranguape.

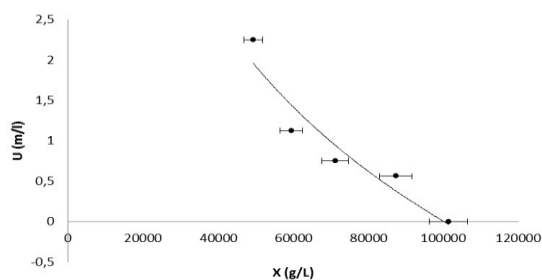


Figura 45 - Média da concentração da manta de lodo em função da velocidade ascensional aplicada para lodo da ETE-Pedro Câmara.

A sedimentação da manta de lodo pode ser modelada usando a metodologia desenvolvida por Vesilind (1968), onde plota-se o $\ln(U)$ contra os valores calculados de X . Através das linhas obtidas, pelo método dos mínimos quadrados, os parâmetros da equação linear podem ser obtidos. Na Figura 46 está a equação com os dados da ETE-Aratuba.

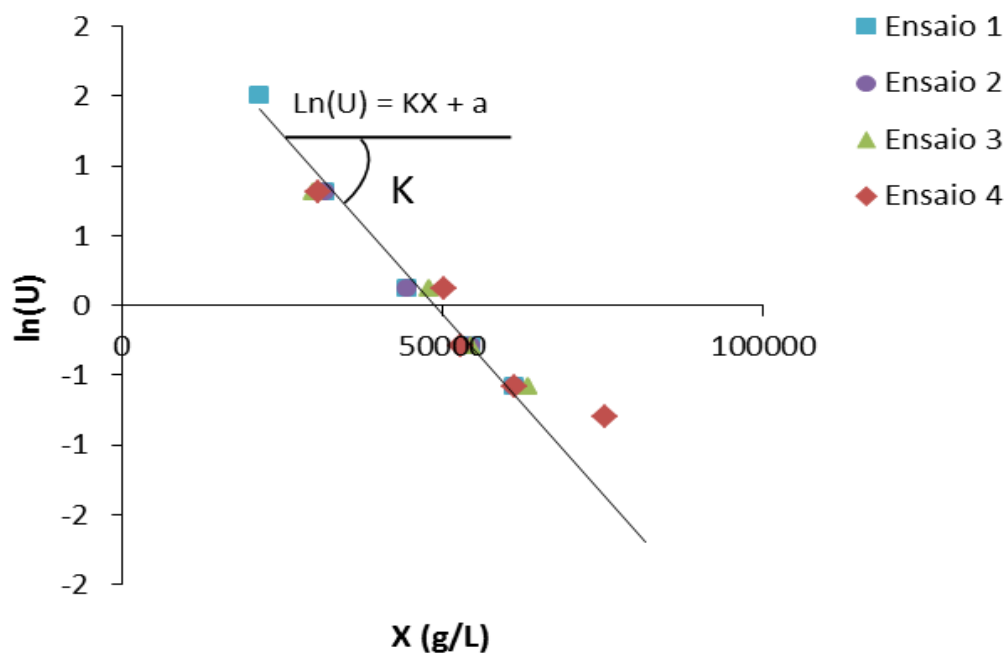


Figura 46 - Resultados da concentração do lodo (X) e $\ln(U)$ para o lodo da ETE-Aratuba.

Na Tabela 7 estão dispostos os dados operacionais de todas as estações abordadas nesse trabalho na época da coleta das amostras.

Tabela 7 - Dados operacionais de todas as ETEs abordadas nesse trabalho.

Reator	TDH ^(a)	U ^(b)	DQO ^(c)
	(h)	(m/h)	(mg/L)
ETE-Aracapé	10,17	0,88	1036,5
ETE-Novo Barroso	14,90	1,01	1208,0
ETE-Curió I	12,36	1,61	1066,1
ETE-Riacho Doce	6,13	1,63	466,1
ETE-Pajuçara	3,38	1,44	569,2
ETE-Zeza do Tijolo	1,34	3,90	433,4
ETE-Paupina	13,57	0,40	854,9
ETE-Rosalina	3,02	1,57	412,5
ETE-Sítio Santana	6,60	0,75	1612,4
ETE-Curió II	5,16	0,96	665,4
ETE-Pôr-do-Sol	16,19	0,87	638
ETE-Aratuba	7,15	0,64	328,9
ETE-São Francisco	5,87	0,78	1219,4
ETE-Cascavel	6,01	0,78	1313,2
ETE-Guaramiranga	3,44	1,33	866,8
ETE-Dakota	5,83	1,66	3003,8
ETE-Pedro Câmara	5,66	1,58	696,3
ETE-Mulungu	39,43	0,23	688,1
ETE-Heineken	0,42	16,54	2676,0

(a) TDH - Tempo de Detenção Hidráulica real (h). (b) U é a velocidade ascensional real (m/h). (c) DQO média bruta do efluente (mg/L). Fonte: Relatório da CAGECE.

Nas Tabelas 8 a 11 estão dispostos os parâmetros operacionais da UES e os parâmetros de Vesilind, calculados pelo método dos mínimos quadrados da equação linear. Os valores de IVL para esses lodos não se enquadram no intervalo de aplicação do teste para os lodos anaeróbios, entre 40 e 400 mL/g, conforme relatado por Leitão *et al.* (2004).

Como no trabalho desenvolvido por Leitão *et al.* (2004), o IVL não se mostrou um bom parâmetro para caracterizar a sedimentabilidade do lodo. Segundo o mesmo autor as causas prováveis para isso são:

- O IVL não é independente da concentração de lodo;
- O IVL é altamente afetado pelo procedimento experimental durante o teste;
- O IVL define apenas um ponto na curva de sedimentação;

- é intuitivamente duvidoso que dois parâmetros de um modelo podem ser baseados em somente 1 valor de IVL, para um teste realizado para uma única concentração de lodo.

Diante das observações feitas acima, fez-se necessário o estudo desses parâmetros de forma separada para cada velocidade ascensional aplicada no ensaio. Na Tabela 8 estão dispostos os dados de operação real de todas as ETEs que cederam amostras para o presente trabalho e os parâmetros de Vesilind para velocidade ascensional de 0,56m/h.

Tabela 8 - Dados operacionais de todas as ETEs estudadas e parâmetros de sedimentabilidade dos respectivos lodos calculados pelo modelo de Vesilind na velocidade ascensional de 0,56m/h.

Reator	U ^(a)	Sedimentabilidade		
		IVL ^(b)	K ^(c)	U ₀ ^(d)
ETE-Aracapé	0,88	18,35	-0,00003	6,468
ETE-Novo Barroso	1,01	27,52	-0,00008	6,731
ETE-Riacho Doce	1,61	33,32	-0,00005	4,080
ETE-Curió I	1,63	20,69	-0,00004	21,160
ETE-Paupina	1,44	22,7	-0,00009	24,187
ETE-Zeza do Tijolo	3,90	22,61	-0,00008	12,771
ETE-Pajuçara	0,40	19,57	-0,00006	6,904
ETE- Sítio Santana	1,57	29,82	-0,00004	4,931
ETE-Curió II	0,75	25,77	-0,00004	9,636
ETE-Heineken	0,96	45,5	-0,00003	5,182
ETE-Baturité-São Francisco	0,87	9,41	-0,00003	7,053
ETE-Pôr-do-Sol	0,64	45,23	-0,00002	4,571
ETE-Guaramiranga	0,78	22,83	-0,00004	16,109
ETE-Aratuba	0,78	33,49	-0,00004	6,606
ETE-Mulungu	1,33	89,16	-0,00010	5,625
ETE-Cascavel	1,66	30,47	-0,00009	6,183
ETE-Rosalina	1,58	12,84	-0,00007	13,293
ETE-Dakota-Maranguape	0,23	20,44	-0,00005	12,047
ETE-Pedro Câmara	16,54	18,35	-0,00003	6,468

(a) U é a velocidade ascensional real usada nos reatores de onde foram coletadas as amostras de lodo (m/h). (b) IVL - Índice Volumétrico do Lodo (diluído) (mL/g). (c) K - Parâmetro de Vesilind calculado (L/g). (d) U₀ - Parâmetro de Vesilind Calculado (m/h).

A partir dos valores dos parâmetros de Vesilind dispostos na tabela acima, pode-se observar que o valor de K variou entre -0,0002 a -0,0010 L/g, e U₀ variou, de 4 a 24m/h, enquanto que o TDH permaneceu constante. Sendo assim, fica evidente que a sedimentabilidade do lodo é afetada por outros fatores além do tempo de detenção hidráulica (TDH) ou da velocidade ascensional (U). A adaptação do lodo a um valor de U (representado na tabela pelo U), a carga orgânica afluente ao sistema e os

procedimentos operacionais do reator estão entre outros fatores que devem ser considerados.

Na Tabela 9 estão dispostos os dados de operação real de todas as ETEs que cederam amostras para o presente trabalho e os parâmetros de Vesilind para velocidade ascensional de 0,75m/h.

Tabela 9 - Dados operacionais de todas as ETEs estudadas e parâmetros de sedimentabilidade dos respectivos lodos calculados pelo modelo de Vesilind na velocidade ascensional de 0,75m/h.

Reator	U ^(a)	Sedimentabilidade		
		IVL ^(b)	K ^(c)	U ₀ ^(d)
ETE-Aracapé	0,88	28,45	-0,00009	5,625
ETE-Novo Barroso	1,01	27,52	-0,00008	5,239
ETE-Riacho Doce	1,61	33,32	-0,00008	8,500
ETE-Curió I	1,63	20,69	-0,00004	16,784
ETE-Paupina	1,44	22,7	-0,00006	7,055
ETE-Zeza do Tijolo	3,90	22,61	-0,00004	1,7203
ETE-Pajuçara	0,40	19,57	-0,00006	6,904
ETE- Sítio Santana	1,57	29,82	-0,00004	4,024
ETE-Curió II	0,75	25,77	-0,00004	7,411
ETE-Heineken	0,96	45,5	-0,00003	4,597
ETE-Baturité-São Francisco	0,87	9,41	-0,00002	5,845
ETE-Pôr-do-Sol	0,64	45,23	-0,00003	7,219
ETE-Guaramiranga	0,78	22,83	-0,00004	14,767
ETE-Aratuba	0,78	33,49	-0,00004	7,977
ETE-Mulungu	1,33	89,16	-0,00017	15,568
ETE-Cascavel	1,66	30,47	-0,00011	10,789
ETE-Rosalina	1,58	12,84	-0,00007	15,718
ETE-Dakota-Maranguape	0,23	20,44	-0,00004	8,140
ETE-Pedro Câmara	16,54	18,35	-0,00003	9,059

(a) U é a velocidade ascensional real usada nos reatores de onde foram coletadas as amostras de lodo (m/h). (b) IVL - Índice Volumétrico do Lodo (diluído) (mL/g). (c) K - Parâmetro de Vesilind calculado (L/g). (d) U₀ - Parâmetro de Vesilind Calculado (m/h).

Mais uma vez, apesar da manutenção do TDH (6hs) nas diferentes estações, os parâmetros de Vesilind variaram entre -0,0002 a -0,0017 L/g, para K, e de 1 a 17m/h para U₀.

Na Tabela 10 estão dispostos os dados de operação real de todas as ETEs que cederam amostras para o presente trabalho e os parâmetros de Vesilind para velocidade ascensional de 1,125m/h.

Tabela 10 - Dados operacionais de todas as ETEs estudadas e parâmetros de sedimentabilidade dos respectivos lodos calculados pelo modelo de Vesilind na velocidade ascensional de 1,125m/h.

Reator	U ^(a)	Sedimentabilidade		
		IVL ^(b)	K ^(c)	U ₀ ^(d)
ETE-Aracapé	0,88	28,45	-0,00009	5,760
ETE-Novo Barroso	1,01	27,52	-0,00007	6,332
ETE-Riacho Doce	1,61	33,32	-0,00008	9,964
ETE-Curió I	1,63	20,69	-0,00004	9,657
ETE-Paupina	1,44	22,7	-0,00008	12,203
ETE-Zeza do Tijolo	3,90	22,61	-0,00004	5,801
ETE-Pajuçara	0,40	19,57	-0,00004	8,325
ETE- Sítio Santana	1,57	29,82	-0,00003	4,140
ETE-Curió II	0,75	25,77	-0,00004	6,177
ETE-Heineken	0,96	45,5	-0,00003	6,326
ETE-Baturité-São Francisco	0,87	9,41	-0,00002	6,430
ETE-Pôr-do-Sol	0,64	45,23	-0,00004	8,698
ETE-Guaramiranga	0,78	22,83	-0,00004	16,496
ETE-Aratuba	0,78	33,49	-0,00005	9,531
ETE-Mulungu	1,33	89,16	-0,00014	9,930
ETE-Cascavel	1,66	30,47	-0,00012	14,832
ETE-Rosalina	1,58	12,84	-0,00008	20,964
ETE-Dakota-Maranguape	0,23	20,44	-0,00005	12,925
ETE-Pedro Câmara	16,54	18,35	-0,00003	10,071

(a) U é a velocidade ascensional real usada nos reatores de onde foram coletadas as amostras de lodo (m/h). (b) IVL - Índice Volumétrico do Lodo (diluído) (mL/g). (c) K - Parâmetro de Vesilind calculado (L/g). (d) U₀ - Parâmetro de Vesilind Calculado (m/h).

Como observado anteriormente, apesar da manutenção do TDH (4hs) nas diferentes estações, os parâmetros de Vesilind variaram entre -0,0002 a -0,0014L/g, para K e de 4 a 20m/h para U₀.

Na Tabela 11 estão dispostos os dados de operação real de todas as ETEs que cederam amostras para o presente trabalho e os parâmetros de Vesilind para velocidade ascensional de 2,25m/h.

Tabela 11 - Dados operacionais de todas as ETEs estudadas e parâmetros de sedimentabilidade dos respectivos lodos calculados pelo modelo de Vesilind na velocidade ascensional de 2,25m/h.

Reator	U ^(a)	Sedimentabilidade		
		IVL ^(b)	K ^(c)	U ₀ ^(d)
ETE-Aracapé	0,88	28,45	-0,00011	20,718
ETE-Novo Barroso	1,01	27,52	-0,00008	5,458
ETE-Riacho Doce	1,61	33,32	-0,00009	9,209
ETE-Curió I	1,63	20,69	-0,00005	10,433
ETE-Paupina	1,44	22,7	-0,00005	10,433
ETE-Zeza do Tijolo	3,90	22,61	-0,00004	7,197
ETE-Pajuçara	0,40	19,57	-0,00008	7,425
ETE- Sítio Santana	1,57	29,82	-0,00004	5,818
ETE-Curió II	0,75	25,77	-0,00004	9,202
ETE-Heineken	0,96	45,5	-0,00004	6,877
ETE-Baturité-São Francisco	0,87	9,41	-0,00003	8,857
ETE-Pôr-do-Sol	0,64	45,23	-0,00005	15,147
ETE-Guaramiranga	0,78	22,83	-0,00004	19,163
ETE-Aratuba	0,78	33,49	-0,00005	12,325
ETE-Mulungu	1,33	89,16	-0,00011	8,237
ETE-Cascavel	1,66	30,47	-0,00014	15,454
ETE-Rosalina	1,58	12,84	-0,00008	22,653
ETE-Dakota-Maranguape	0,23	20,44	-0,00007	29,049
ETE-Pedro Câmara	16,54	18,35	-0,00004	14,713

(a) U é a velocidade ascensional real usada nos reatores de onde foram coletadas as amostras de lodo (m/h). (b) IVL - Índice Volumétrico do Lodo (diluído) (mL/g). (c) K - Parâmetro de Vesilind calculado (L/g). (d) U₀ - Parâmetro de Vesilind Calculado (m/h).

Como observado anteriormente, apesar da manutenção do TDH (4hs) nas diferentes estações, os parâmetros de Vesilind variaram entre -0,0003 a -0,0011L/g, para K e de 5 a 30 m/h para U₀.

Expansibilidade

Uma característica importante dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente é a expansibilidade da manta de lodo. Particularmente para reatores UASB, esse parâmetro está relacionado com a capacidade de retenção de lodo no sistema, sendo mais relevante em sistemas operados com velocidades ascensionais altas ou durante uma sobrecarga orgânica/hidráulica. Nessas situações, dentro do leito do reator, o espaço entre a manta de lodo e o separador de fases é menor e, conseqüentemente, o risco de perdas da biomassa do sistema (manta de lodo) aumenta.

Para melhor entendimento dessas perdas de biomassa (frequentes em sistemas operados com baixos TDHs) foram também analisados os dados de expansibilidade dos lodos coletados.

Nas Figuras de 47 a 64 mostra a expansibilidade calculada (ϵ) de amostra de lodo retirada das ETEs abordadas nesta pesquisa. As diferentes alturas da manta de lodo foram alcançadas variando-se a velocidade ascensional na UES. Nota-se que o aumento da velocidade ascensional leva a expansão da manta de lodo. Porém, como esse aumento tende a formar uma curva, pode-se afirmar que há diminuição da expansibilidade. Ou seja, a manta de lodo expande, cada vez menos, conforme é aumentada a velocidade ascensional na UES.

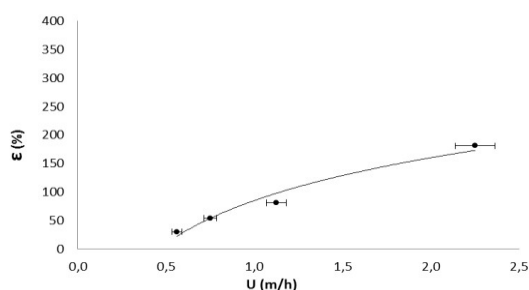


Figura 47 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Aracapé.

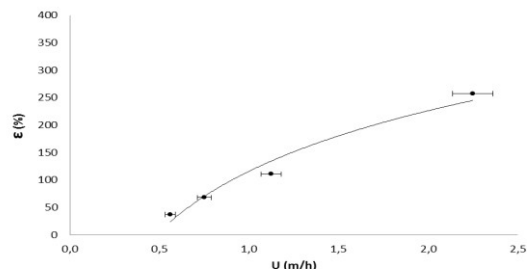


Figura 48 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Novo Barroso.

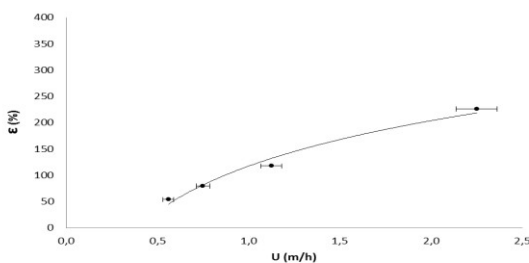


Figura 49 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Riacho Doce.

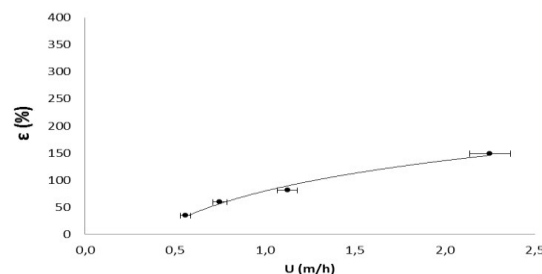


Figura 50 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Curió I.

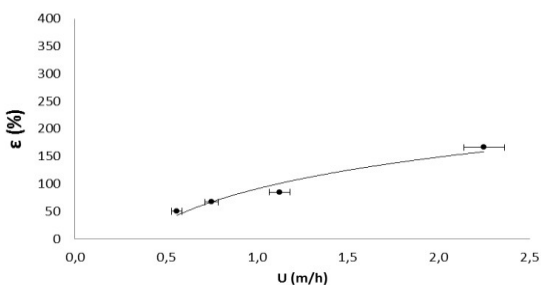


Figura 51 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Paupina.

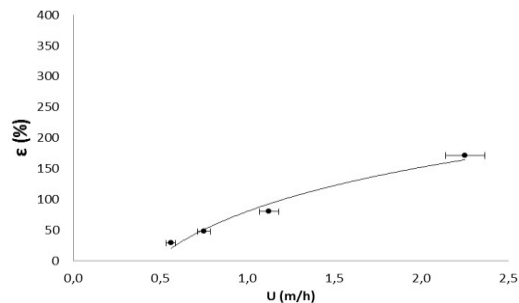


Figura 52 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ϵ) para ETE-Zeza do Tijolo.

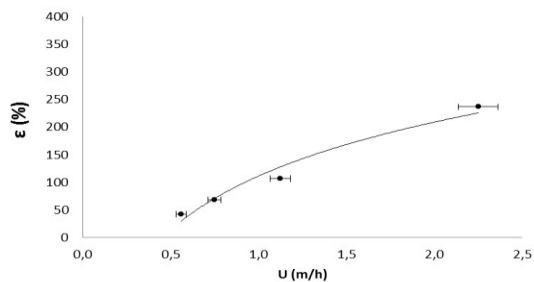


Figura 53 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ε) para ETE-Pajuçara.

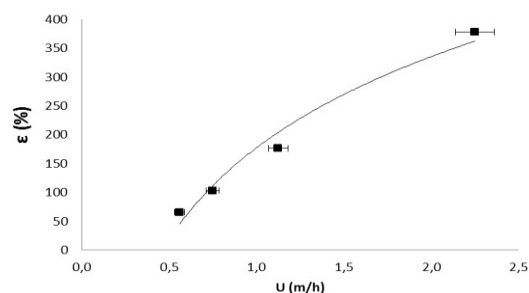


Figura 54 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ε) para ETE-Sítio Santana.

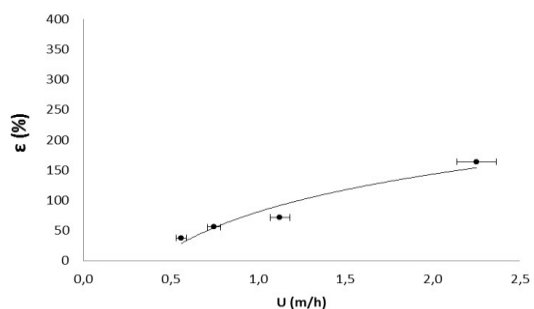


Figura 55 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ε) para ETE-Curió II.

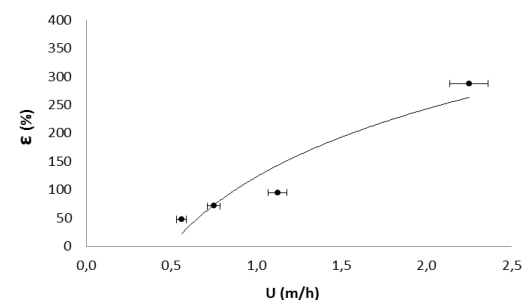


Figura 56 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ε) para ETE-Heineken.

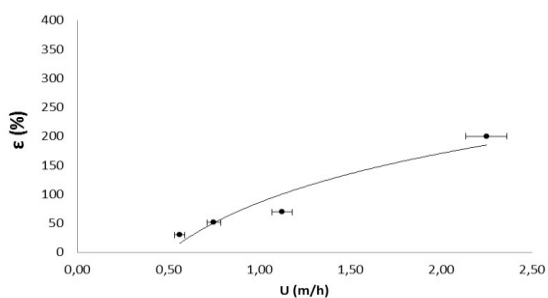


Figura 57 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ε) para ETE-São Francisco.

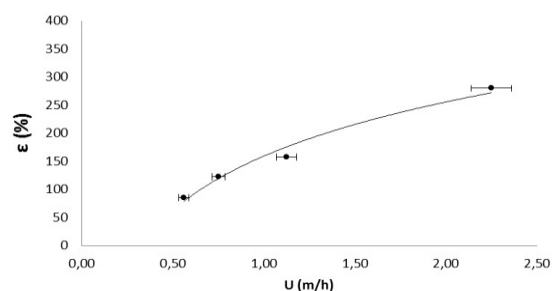


Figura 58 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ε) para ETE-Pôr-do-Sol.

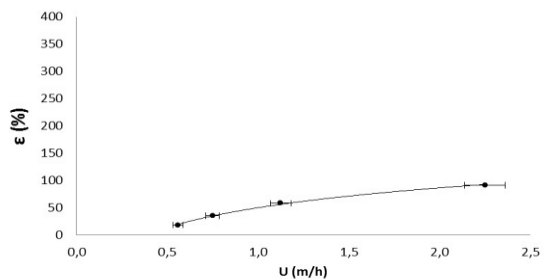


Figura 59 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ε) para ETE-Guaramiranga.

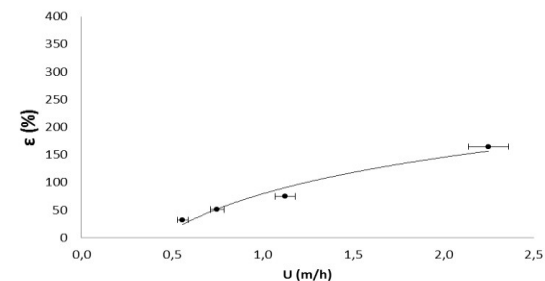


Figura 60 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ε) para ETE-Aratuba.

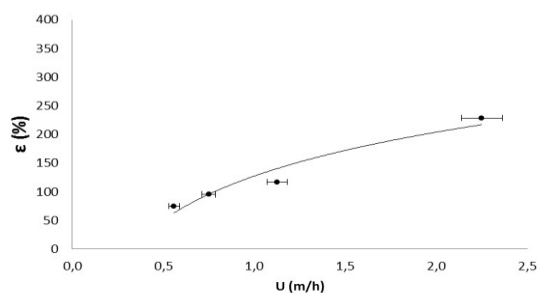


Figura 61 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ε) para ETE-Mulungu.

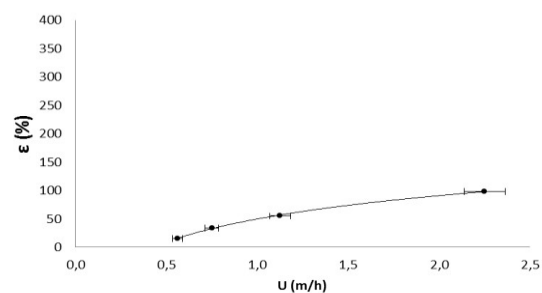


Figura 62 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ε) para ETE-Cascavel.

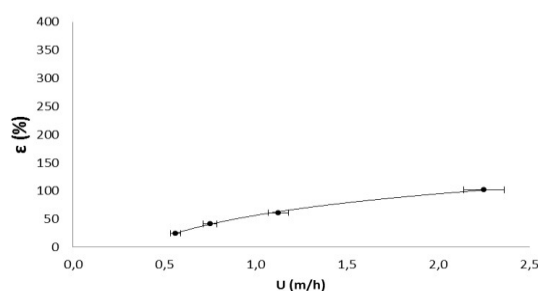


Figura 63 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ε) para ETE-Rosalina.

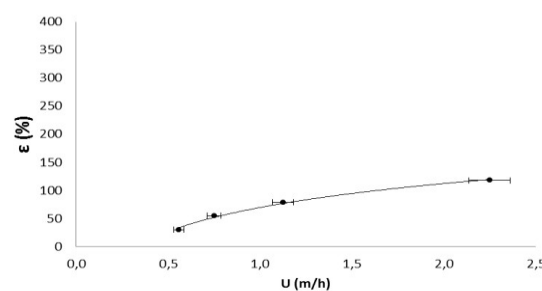


Figura 64 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ε) para ETE-Dakota.

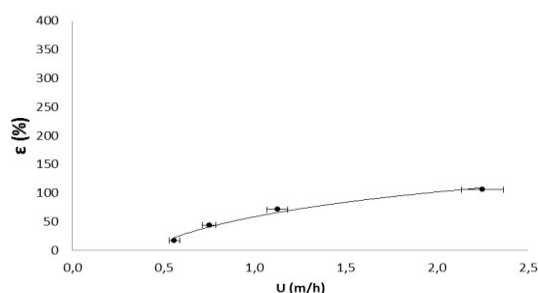


Figura 65 - Resultados experimentais da média da velocidade ascensional (U) em função da expansão do lodo (ε) para ETE-Pedro Câmara.

Nas figuras acima estão representadas as médias das velocidades ascensionais aplicadas aos quatro ensaios e os seus respectivos valores de expansibilidade da manta de lodo, com o desvio padrão de 5%. Os pontos se apresentam sobrepostos, formando apenas uma curva, indicando o método utilizado como confiável.

A expansão da manta de lodo pode ser modelada usando a metodologia desenvolvida por Richardson e Zaki (1954), onde plota-se o $\log(U)$ contra os valores calculados de ϵ . Através das linhas obtidas, pelo método dos mínimos quadrados, os

parâmetros da equação linear podem ser obtidos. Na Figura 66 está a equação linear para os dados do ensaio de sedimentabilidade para ETE-Aratuba.

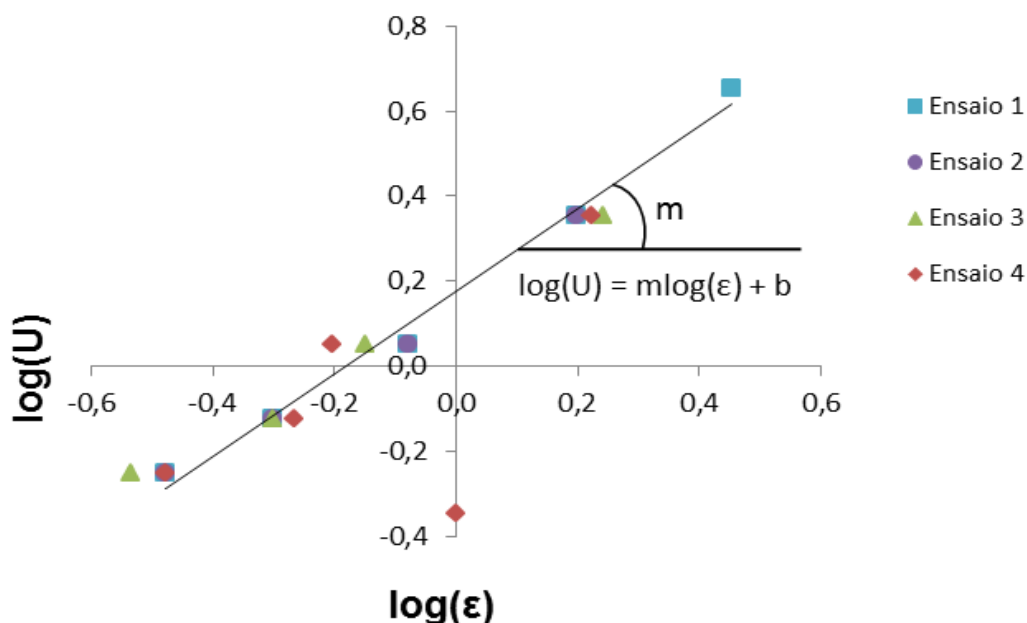


Figura 66 - Resultados da expansão do lodo (ϵ) e $\log(U)$ para lodo da ETE-Aratuba.

Os resultados dos parâmetros calculados pelo método dos mínimos quadrados, da equação linear, e através da metodologia desenvolvida por Richardson e Zaki (1954) e suas equações, estão dispostos nas Tabelas 12 a 15.

Na Tabela 12 estão dispostos os dados de todas as ETEs quanto à expansibilidade de seus lodos. Para a velocidade de 0,56 m/h obteve-se resultados para os parâmetros de Richardson e Zaki.

Do mesmo modo que nos ensaios de sedimentabilidade, fica evidente que a expansibilidade do lodo é afetada por outros fatores além do tempo de detenção hidráulica (TDH) ou da velocidade ascensional (U). Aqui também a carga orgânica afluyente ao sistema e os procedimentos operacionais do reator estão entre outros fatores que devem ser considerados.

Tabela 12 - Dados operacionais de todas as ETEs estudadas e parâmetros de expansibilidade dos respectivos lodos calculados pelo modelo de Richardson e Zaki na velocidade ascensional de 0,56m/h.

Reator	U ^(a)	Expansibilidade	
		m ^(b)	U ₀ ^(c)
ETE-Aracapé	0,88	0,6684	1,017
ETE-Novo Barroso	1,01	0,4874	1,081
ETE-Riacho Doce	1,61	0,6787	0,875
ETE-Curió I	1,63	0,2642	1,021
ETE-Paupina	1,44	0,5112	1,090
ETE-Zeza do Tijolo	3,90	1,6028	0,768
ETE-Pajuçara	0,40	0,6008	1,042
ETE- Sítio Santana	1,57	1,0067	0,540
ETE-Curió II	0,75	0,8992	1,031
ETE-Heineken	0,96	0,7515	0,868
ETE-Baturité-São Francisco	0,87	0,5745	1,038
ETE-Pôr-do-Sol	0,64	1,2703	0,593
ETE-Guaramiranga	0,78	0,3185	1,065
ETE-Aratuba	0,78	0,6147	1,059
ETE-Mulungu	1,33	2,0905	0,682
ETE-Cascavel	1,66	0,3474	1,064
ETE-Rosalina	1,58	0,3926	1,068
ETE-Dakota-Maranguape	0,23	0,7557	1,066
ETE-Pedro Câmara	16,54	0,7600	1,059

(a) U é a velocidade ascensional real usada nos reatores de onde foram coletadas as amostras de lodo (m/h). (b) Parâmetro empírico calculado (L/g). (c) Parâmetro empírico calculado (m/h).

Na Tabela 13 estão dispostos os dados de todas as ETE's quanto à expansibilidade de seus lodos. Para a velocidade de 0,75 m/h obteve-se resultados para os parâmetros de Richardson e Zaki.

Tabela 13 - Dados operacionais de todas as ETEs estudadas e parâmetros de expansibilidade dos respectivos lodos calculados pelo modelo de Richardson e Zaki na velocidade ascensional de 0,75m/h.

Reator	U ^(a)	Expansibilidade	
		m ^(b)	U ₀ ^(c)
ETE-Aracapé	0,88	0,7272	1,194
ETE-Novo Barroso	1,01	0,6462	1,213
ETE-Riacho Doce	1,61	1,0184	1,029
ETE-Curió I	1,63	0,6897	2,023
ETE-Paupina	1,44	0,8046	1,236
ETE-Zeza do Tijolo	3,90	0,6114	1,381
ETE-Pajuçara	0,40	0,4809	1,314
ETE- Sítio Santana	1,57	0,5694	1,065
ETE-Curió II	0,75	0,8350	1,262
ETE-Heineken	0,96	0,7306	0,910
ETE-Baturité-São Francisco	0,87	0,6584	1,322
ETE-Pôr-do-Sol	0,64	1,1222	0,662
ETE-Guaramiranga	0,78	0,8445	1,804
ETE-Aratuba	0,78	0,7963	1,417
ETE-Mulungu	1,33	1,4514	0,740
ETE-Cascavel	1,66	0,5825	1,818
ETE-Rosalina	1,58	0,8500	1,860
ETE-Dakota-Maranguape	0,23	0,6864	1,456
ETE-Pedro Câmara	16,54	0,6364	1,593

(a) U é a velocidade ascensional real usada nos reatores de onde foram coletadas as amostras de lodo (m/h). (b) Parâmetro empírico calculado (L/g). (c) Parâmetro empírico calculado (m/h).

Na Tabela 14 estão dispostos os dados de todas as ETE's quanto à expansibilidade de seus lodos. Para a velocidade de 1,125 m/h obtiveram-se resultados para os parâmetros de Richardson e Zaki.

Tabela 14 - Dados operacionais de todas as ETEs estudadas e parâmetros de expansibilidade dos respectivos lodos calculados pelo modelo de Richardson e Zaki na velocidade ascensional de 1,125m/h.

Reator	U ^(a)	Expansibilidade	
		m ^(b)	U ₀ ^(c)
ETE-Aracapé	0,88	0,7374	1,199
ETE-Novo Barroso	1,01	0,4944	1,714
ETE-Riacho Doce	1,61	1,0801	1,055
ETE-Curió I	1,63	0,9370	1,343
ETE-Paupina	1,44	1,1524	1,140
ETE-Zeza do Tijolo	3,90	0,3847	1,551
ETE-Pajuçara	0,40	1,0465	0,919
ETE- Sítio Santana	1,57	0,7806	0,761
ETE-Curió II	0,75	0,7432	1,243
ETE-Heineken	0,96	0,8134	1,126
ETE-Baturité-São Francisco	0,87	0,6974	1,430
ETE-Pôr-do-Sol	0,64	1,2072	0,647
ETE-Guaramiranga	0,78	0,7275	2,068
ETE-Aratuba	0,78	0,8913	1,422
ETE-Mulungu	1,33	1,1973	0,7654
ETE-Cascavel	1,66	0,6470	2,116
ETE-Rosalina	1,58	1,0469	2,043
ETE-Dakota-Maranguape	0,23	0,9267	1,675
ETE-Pedro Câmara	16,54	0,5147	1,847

(a) U é a velocidade ascensional real usada nos reatores de onde foram coletadas as amostras de lodo (m/h). (b) Parâmetro empírico calculado (L/g). (c) Parâmetro empírico calculado (m/h).

Na Tabela 15 estão dispostos os dados de todas as ETEs quanto à expansibilidade de seus lodos. Para a velocidade de 2,25 m/h obtiveram-se resultados para os parâmetros de Richardson e Zaki.

Tabela 15 - Dados operacionais de todas as ETEs estudadas e parâmetros de expansibilidade dos respectivos lodos calculados pelo modelo de Richardson e Zaki na velocidade ascensional de 2,25m/h.

Reator	U ^(a)	Expansibilidade	
		m ^(b)	U ₀ ^(c)
ETE-Aracapé	0,88	0,7023	2,033
ETE-Novo Barroso	1,01	0,9188	0,566
ETE-Riacho Doce	1,61	1,0236	0,862
ETE-Curió I	1,63	1,1595	0,821
ETE-Paupina	1,44	1,4623	0,965
ETE-Zeza do Tijolo	3,90	0,6336	1,720
ETE-Pajuçara	0,40	0,9207	0,819
ETE- Sítio Santana	1,57	0,876	0,695
ETE-Curió II	0,75	0,8311	1,383
ETE-Heineken	0,96	0,7704	1,122
ETE-Baturité-São Francisco	0,87	0,8546	1,320
ETE-Pôr-do-Sol	0,64	1,4644	0,589
ETE-Guaramiranga	0,78	0,8438	2,399
ETE-Aratuba	0,78	0,9766	1,500
ETE-Mulungu	1,33	0,9280	1,005
ETE-Cascavel	1,66	0,9172	2,062
ETE-Rosalina	1,58	1,0702	2,150
ETE-Dakota-Maranguape	0,23	1,2297	2,027
ETE-Pedro Câmara	16,54	0,6338	2,106

(a) U é a velocidade ascensional real usada nos reatores de onde foram coletadas as amostras de lodo (m/h). (b) Parâmetro empírico calculado (L/g). (c) Parâmetro empírico calculado (m/h).

5.2 Análise estatística

Para a análise estatística o estudo foi composto por 684 observações. A Figura 67, abaixo, apresenta a frequência da variável resposta (altura da manta de lodo, cm) analisada nesta pesquisa.

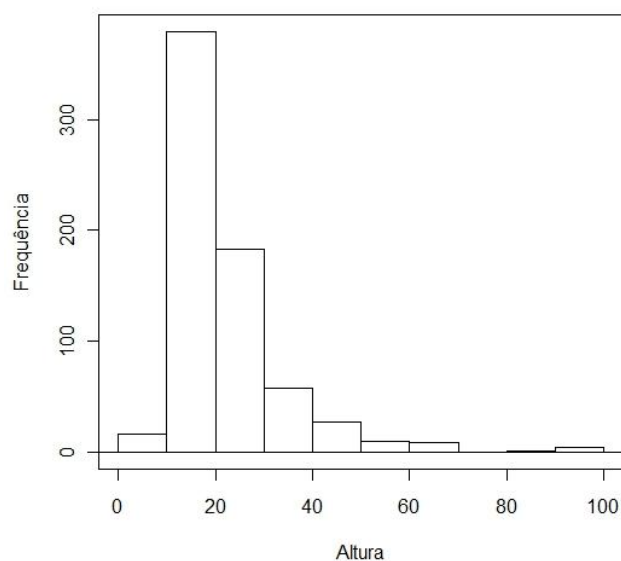


Figura 67 - Histograma da variável altura da manta de lodo (cm).

As Tabelas 16 e 17 apresentam as estatísticas descritivas da altura da manta de lodo em relação às velocidades adotadas no experimento.

Tabela 16 - Estatísticas descritivas da altura da manta de lodo observada em relação à velocidade ascensional padrão adotada.

Velocidade Ascensional Padrão (m/h)	Estatísticas Descritivas				
	Mínimo (cm)	Máximo (cm)	Média (cm)	Desvio-Padrão (cm)	C.V. %
0,56	7,00	46,50	19,56	7,27	37,17
0,75	9,00	47,00	21,04	8,22	39,07
1,125	9,50	50,00	20,62	7,80	37,83
2,25	9,50	63,50	28,12	17,73	63,05

(C.V.): Coeficiente de variação.

Tabela 17 - Estatísticas descritivas da altura observada em relação às velocidades variada em função de cada velocidade padrão adotada.

Velocidade Ascensional Padrão (m/h)	Velocidade Ascensional Variada (m/h)	Estatísticas Descritivas				
		Mínimo (cm)	Máximo (cm)	Média (cm)	Desvio-Padrão (cm)	C.V. %
0,56	0,45	7,00	18,00	13,35	2,41	18,05
	0,56	9,00	26,00	15,76	2,94	18,65
	0,75	11,50	28,50	18,45	3,34	18,10
	1,125	12,50	31,00	20,42	4,12	20,18
	2,25	19,00	46,50	29,79	7,96	26,72
	4,5	-	-	-	-	-
0,75	0,45	-	-	-	-	-
	0,56	9,00	26,00	14,53	3,42	23,54
	0,75	11,00	28,50	17,45	3,39	19,43
	1,125	13,50	31,00	21,16	4,31	20,37
	2,25	19,00	47,00	31,01	8,66	27,93
	4,5	-	-	-	-	-
1,125	0,45	-	-	-	-	-
	0,56	9,50	26,00	15,20	3,77	24,80
	0,75	9,50	27,50	16,70	3,73	22,34
	1,125	10,50	31,00	20,28	4,42	21,79
	2,25	19,00	50,00	30,31	7,60	25,07
	4,5	-	-	-	-	-
2,25	0,45	-	-	-	-	-
	0,56	9,50	24,50	15,73	3,97	25,24
	0,75	10,50	30,00	18,51	5,35	28,90
	1,125	11,50	37,00	21,72	6,59	30,34
	2,25	14,00	63,50	32,28	12,09	37,45
	4,5	23,00	97,50	52,34	21,37	40,83

(C.V.): coeficiente de variação.

(-): valores que não foram testados no experimento.

5.2.1 Validação do experimento

Diante da não homogeneidade das variâncias e não normalidade dos dados ($p < 9,032 \cdot 10^{-15}$) optou-se por uma análise através de modelos lineares generalizados, no qual a variável dependente não necessita de transformação para ser normalizada.

O modelo *Normal Inversa* com função de ligação logarítmica se mostrou adequado para a variável resposta de interesse, no caso, para altura da manta de lodo. Desse modo, foi feito o quadro da *ANODEV* (quadro da análise de desvio), representada na Tabela 18 abaixo.

Tabela 18 - ANODEV para MLG com distribuição normal inversa e função de ligação logarítmica da altura da manta dos lodos.

Fonte de variação	Desvio	t	p-valor	
Estação	0,0072664	1,752	0,080220	ns
Velocidade Padrão	0,0559445	3,702	0,000231	*
Variação de Velocidade	0,0719992	8,417	2,31e-16	*
Padrão:Variação	0,0410479	-2,220	0,026777	*
Estação:Padrão	0,0047700	-1,832	0,067425	ns
Estação:Variação	0,0060953	-1,798	0,072571	ns
Estação:Padrão:Variação	0,0034173	0,241	0,809648	ns

* representa p-valor $< 0,05$ e **ns** significa que a hipótese testada não é significativa.

Da tabela acima resulta:

- A estação no qual o lodo foi colhido não produz efeito aditivo sobre a altura da manta do lodo, ou seja, a mudança na altura do lodo não sofre influencia devido à estação no qual foi coletada. Sendo assim, fica caracterizada a uniformidade dos lodos colhidos nas ETes da CAGECE.
- A velocidade padrão (0,56; 0,75; 1,125; 2,25) produz efeito aditivo na altura da manta do lodo, p-valor igual a 0,000231 ($< 0,05$).
- As velocidades variadas (0,45; 0,56; 0,75; 1,125; 2,25; 4,5), sem considerar a padrão, produzem efeito aditivo na altura da manta do lodo com p-valor igual a $2,31 \cdot 10^{-16}$ ($< 0,05$).
- A interação dupla entre velocidade padrão e velocidade variada é significativa, com um p-valor igual a 0,026777 ($< 0,05$), ou seja, esta interação produz efeito significativo sobre a altura da manta do lodo.

5.2.1.1 Teste de Diferença de Médias



Interação Padrão versus Variação

Como a interação padrão e variação mostrou-se significativa foi realizado o teste de *Kruskal-Wallis* para verificar se existe diferença entre as medias das alturas da manta de lodo observadas nas variações de velocidade fixando a velocidade padrão.

Velocidade Padrão 0,56m/h: Para o ensaio com velocidade padrão 0,56m/h, a velocidade que resultou na maior média de altura da manta de lodo foi à velocidade de 2,25m/h (altura de 29,79cm) e as velocidades que resultaram na menor altura foram as de 0,45m/h (altura de 13,35cm) e 0,56m/h (altura de 15,76cm), ambas consideradas estatisticamente iguais (Tabelas 19 e 20).

Tabela 19 - Teste de Kruskal Wallis para diferença de média da altura da manta do lodo em relação às velocidades variadas com velocidade padrão 0,56m/h.

Velocidades Comparadas (m/h)	Diferença
0.45 - 0.56	Não
0.45 - 0.75	Sim
0.45 - 1.125	Sim
0.45 - 2.25	Sim
0.56 - 0.75	Não
0.56 - 1.125	Sim
0.56 - 2.25	Sim
0.75 - 1.125	Não
0.75 - 2.25	Sim
1.125 - 2.25	Sim

Tabela 20 - Análise das velocidades comparadas na Tabela 19.

Velocidade (m/h)	Média das alturas da manta de lodo (cm)
0.45	13,35
0.56	15,76
0.75	18,45
1.125	20,42
2.25	29,79

Portanto, para este ensaio somente variações de velocidade maiores ou iguais a 0,3m/h levaram a mudanças significativas na altura da manta de lodo em função da velocidade padrão.

Velocidade Padrão 0,75m/h: Para velocidade padrão 0,75m/h, a velocidade que resultou na maior média de altura da manta de lodo foi a de 2,25m/h (altura de 31,01cm) e as menores, 0,56m/h (altura de 14,53cm) e 0,75m/h (altura de 17,45cm), foram consideradas estatisticamente iguais, portanto não havendo diferença entre as duas (Tabelas 21 e 22).

Tabela 21 - Teste de Kruskal Wallis para diferença de média da altura da manta do lodo em relação às velocidades variadas com velocidade padrão 0,75m/h.

Velocidades Comparadas (m/h)	Diferença
0.56 - 0.75	Não
0.56 – 1.125	Sim
0.56 - 2.25	Sim
0.75 – 1.125	Sim
0.75 - 2.25	Sim
1.125 - 2.25	Sim

Tabela 22 - Análise das velocidades comparadas na Tabela 21.

Velocidade (m/h)	Média das alturas da manta de lodo (cm)
0,56	14,53
0,75	17,45
1,125	21,16
2,25	31,01

Portanto, para este ensaio somente variações de velocidade maiores ou iguais a 0,375m/h levaram a mudanças significativas na altura da manta de lodo em função da velocidade padrão.

Velocidade padrão 1,125m/h: Para velocidade padrão 1,125 m/h, a velocidade que resultou na maior média de altura da manta de lodo foi de 2,25m/h (altura de 31,31cm) e as menores velocidades, 0,56m/h (altura de 15,20cm) e 0,75m/h (altura de 16,70cm), foram consideradas estatisticamente iguais, portanto não havendo diferença entre as duas (Tabelas 23 e 24).

Tabela 23 - Teste de Kruskal Wallis para diferença de média da altura da manta do lodo em relação às velocidades variadas com velocidade padrão 1,125m/h.

Velocidades Comparadas (m/h)	Diferença
0.56 - 0.75	Não
0.56 – 1,125	Sim
0.56 - 2.25	Sim
0.75 – 1,125	Não
0.75 - 2.25	Sim
1,125 - 2.25	Sim

Tabela 24 - Análise das velocidades comparadas na Tabela 23.

Velocidades (m/h)	Média das alturas da manta de lodo (cm)
0,56	15,20
0,75	16,70
1,125	20,28
2,25	30,31

Portanto, para este ensaio somente variações de velocidade maiores ou iguais a 0,56m/h levaram a mudanças significativas na altura da manta de lodo em função da velocidade padrão.

Velocidade padrão 2,25m/h: Para velocidade padrão 2,25m/h, a velocidade que resultou na maior média de altura da manta de lodo foi de 4,5m/h (altura de 52,34cm) e a menor, 0,56m/h (altura de 15,73cm), as velocidades de 0,75m/h (altura de 18,51cm) e 1,125m/h (altura de 21,72cm), foram consideradas estatisticamente iguais, portanto não havendo diferença entre as duas (Tabelas 25 e 26).

Tabela 25 - Teste de Kruskal Wallis para diferença de média da altura da manta do lodo em relação às velocidades variadas com velocidade padrão 2,25m/h.

Velocidades Comparadas (m/h)	Diferença
0.56 - 0.75	Não
0.56 - 1.125	Não
0.56 - 2.25	Sim
0.56 - 4.5	Sim
0.75 - 1.125	Não
0.75 - 2.25	Sim
0.75 - 4.5	Sim
1.125 - 2.25	Sim
1.125 - 4.5	Sim
2.25 - 4.5	Sim

Tabela 26 - Análise das velocidades comparadas na Tabela 25.

Velocidades (m/h)	Média das alturas da manta de lodo (cm)
0,56	15,73
0,75	18,51
1,125	21,72
2,25	32,28
4,5	52,34

Portanto, para este ensaio somente variações de velocidade maiores ou iguais a 1,125m/h levaram a mudanças significativas na altura da manta de lodo em função da velocidade padrão.



Velocidades Variadas

Como a variação da velocidade mostrou-se significativa foi realizado o teste de *Kruskal-Wallis* para verificar se existe diferença entre as medias das alturas da manta de lodo observadas nas variações de velocidade em diferentes velocidades padrão.

Velocidade variada 0,56m/h: Verificou-se que, em média, a velocidade 0,56m/h produz a mesma altura da manta de lodo em todas as velocidades padrão com p-valor igual a 0,09 (Tabela 27).

Tabela 27 - Comparação das médias da velocidade variada para uma velocidade padrão de 0,56 m/h.

Velocidade Padrão (m/h)	Velocidade Variada (m/h)	Medias das alturas da manta de lodo (cm)
0,56	0,56	15,18
0,75	0,56	14,43
1,125	0,56	15,81
2,25	0,56	15,74
Média		15,29

Assim, a altura da manta de lodo foi praticamente à mesma em todos os diferentes ensaios quando do uso da velocidade de 0,56m/h.

Velocidade Variada 0,75m/h: Verificou-se que, em média, a velocidade 0,75m/h produz a mesma altura da manta de lodo em todas as velocidades padrão com p-valor igual a 0,22 (Tabela 28).

Tabela 28 - Comparação das médias da velocidade variada para uma velocidade padrão de 0,75m/h.

Velocidade Padrão (m/h)	Velocidade Variada (m/h)	Medias das alturas da manta de lodo (cm)
0,56	0,75	18,44
0,75	0,75	16,97
1,125	0,75	16,84
2,25	0,75	19,45
Média		17,93

Portanto, a altura da manta de lodo foi praticamente à mesma em todos os diferentes ensaios quando do uso da velocidade de 0,75m/h.

Velocidade Variada 1,125m/h: Verificou-se que, em média, a velocidade 1,125m/h produz a mesma altura da manta de lodo em todas as velocidades padrão com p-valor igual a 0,74 (Tabela 29).

Tabela 29 - Comparação das médias da velocidade variada para uma velocidade padrão de 1,125m/h.

Velocidade Padrão (m/h)	Velocidade Variada (m/h)	Medias das alturas da manta de lodo (cm)
0,56	1,125	21,45
0,75	1,125	22,77
1,125	1,125	20,54
2,25	1,125	23,17
Média		21,98

Portanto, a altura da manta de lodo foi praticamente à mesma em todos os diferentes ensaios quando do uso da velocidade de 1,25m/h.

Velocidade Variada 2,25m/h: Verificou-se que, em média, a velocidade 2,25m/h produz a mesma altura da manta de lodo em todas as velocidades padrão com p-valor igual a 0,92 (Tabela 30).

Tabela 30 - Comparação das médias da velocidade variada para uma velocidade padrão de 2,25m/h.

Velocidade Padrão (m/h)	Velocidade Variada (m/h)	Medias das alturas da manta de lodo (cm)
0,56	2,25	29,35
0,75	2,25	31,34
1,125	2,25	30,21
2,25	2,25	30,58
Média		30,37

Portanto, a altura da manta de lodo foi praticamente à mesma em todos os diferentes ensaios quando do uso da velocidade de 2,25m/h.

Intervalos de confiança para as médias das velocidades variadas ($\alpha=0,05$): A Tabela 31 abaixo mostra os intervalos de confiança para as variações da média da manta de lodo em relação à velocidade adotada, 0,56m/h (altura de 14,86 – 16,02cm), 0,75m/h (altura de 17,33 – 18,56cm), 1,125m/h (altura de 21,15 – 22,64cm) e 2,25m/h (altura de 29,08 – 31,78cm). Ou seja, espera-se que ao usar determinada velocidade, a média da altura da manta do lodo encontre-se dentro do seu respectivo intervalo de confiança, com 5% de significância.

Tabela 31 - Intervalo de confiança para variação das médias das alturas da manta do lodo em relação à velocidade.

Velocidade (m/h)	Média das alturas (cm)	Desvio-Padrão	Erro Amostral	Int. de Confiança
0,56	15,44	3,65	0,58	(14,86 - 16,02)
0,75	17,95	3,88	0,62	(17,33 - 18,57)
1,125	21,90	4,70	0,75	(21,15 - 22,64)
2,25	30,43	8,49	1,35	(29,08 - 31,78)



Velocidades padrões variadas (0,56; 0,75; 1,125; 2,25m/h)

Pela Tabela 32, conclui-se que as velocidades 0,56m/h (altura de 15,44cm) e 0,75m/h (altura de 17,95cm) produzem, em média, a mesma altura da manta de lodo, diferindo das demais. Ou seja, as velocidades 0,56m/h e 0,75m/h produzem o mesmo efeito sobre a altura da manta de lodo.

Tabela 32 - Análise das velocidades comparadas e o efeito na altura da manta de lodo.

Velocidade (m/h)	Média das alturas das mantas de lodo (cm)
0,56	15,44
0,75	17,95
1,125	21,90
2,25	30,43

Finalmente, pode-se concluir que nos ensaios realizados que, quanto maior foi a velocidade padrão usada, maior variação na velocidade ascensional foi necessária para que houvesse mudança significativa na altura da manta de lodo. Ainda, as velocidades testadas de 0,56 e 0,75m/h foram consideradas iguais quanto ao efeito causado à altura da manta de lodo.

6. CONCLUSÕES

Para as condições experimentais utilizadas e após análise dos dados obtidos foi possível concluir que:

- As velocidades ascensionais de 0,56 e 0,75m/h proporcionaram alturas de manta de lodo estatisticamente iguais em todos os ensaios para todas as diferentes amostras. Deste modo constituem um comportamento padrão que pode auxiliar operadores de ETEs quanto ao momento adequado para o descarte de lodo excedente.
- O aumento da velocidade ascensional (U) resultou em uma manta de lodo de melhor sedimentabilidade em todos os ensaios.
- O teste IVL não mostrou nenhum tipo de correlação com as constantes de sedimentabilidade (K e U_0) e nem com as variações de altura da manta de lodo. Deste modo, este procedimento não se mostrou adequado ao estudo da sedimentabilidade dos lodos anaeróbios utilizados neste experimento.
- O aumento progressivo da velocidade ascensional levou ao aumento progressivo da altura da manta de lodo em todos os diferentes ensaios, porém este aumento foi cada vez menor. Portanto, aumentos sucessivos da velocidade ascensional levaram a perda de expansibilidade da manta de lodo.
- Quanto maior foi a velocidade ascensional padrão, maior variação de velocidade foi necessária para provocar alterações significativas na altura da manta de lodo. Ou seja, reatores operados com TDH muito baixos tenderão a não apresentar mudanças na altura da manta de lodo.

6. RECOMENDAÇÕES

Para efeito prático na rotina de operação de um reator tipo UASB, a partir dos dados analisados no presente trabalho, são feitas as seguintes sugestões:

1. Operar o reator cheio de lodo e aplicar os parâmetros de Viselind para dimensionar um sedimentador a ser instalado logo após o reator; ou,
2. Usar o intervalo de confiança da variação das médias das alturas da manta de lodo, para estimar o volume de descarte de lodo excedente. Sempre que o sistema se mostrar próximo ao limite da capacidade de retenção de lodo, o descarte seria calculado usando-se a altura média máxima, para o intervalo de confiança correspondente a U utilizada. Para o caso específico dos reatores da CAGECE, abordados nesse trabalho, a média das alturas das mantas de lodo em descanso foi de 11,47cm. Subtraindo-se as médias das alturas dos diferentes ensaios por este valor, tem-se como resultado a expansão em altura da manta de lodo. Após o cálculo dos volumes correspondentes a cada uma das alturas, é possível se obter a expansão em termos de porcentagem. Finalmente, essa porcentagem pode ser extrapolada para os reatores em escala real (tabela 33).

Tabela 33. Volume de lodo excedente sugerido, para os reatores da CAGECE abordados nesse trabalho, em função do TDH ou velocidade ascensional aplicada.

TDH (hs)	U (m/h)	Lodo excedente para descarte (% do volume útil do reator)
2	2,25	19,0
4	1,125	10,5
6	0,75	6,5
8	0,56	4,0

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, S. B., ZAIAT, M. Desempenho de reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo no tratamento de esgoto sanitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 181-188, 2008.
- AIYUK, S.; FORREZ, I.; LIEVEN, K.; van HAANDEL, A.; VERSTRAETE, W. Anaerobic and complementary treatment of domestic sewage in regions with hot climates – A review. **Bioresource Technology**, v. 97, p. 2225-2241, 2006.
- ALVES, K. G. B. **Estudo da evolução da camada de lodo da lagoa anaeróbia profunda da pedreira nº 7 do sistema de tratamento de esgotos do Roger na Grande João Pessoa – Paraíba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande. Paraíba, 99p, 2006.
- ANDREOLI, C. V. **Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final**: 1ª ed., Rio de Janeiro: ABES, 2009.
- BRITO, A. G.; RODRIGUES, A. C.; MELO, L. F. Contribuição para a caracterização da estrutura da biomassa em reatores de fluxo ascendente (UASB): interações elétricas, polissacarídeos e proteínas. **V Conferência Nacional sobre a Qualidade do Ambiente**. Aveiro, v. 2, p. 1883-1890, 1996.
- CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. ABES, Projeto PROSAB, Rio de Janeiro. 1999.
- CARVALHO, K. Q.; SALGADO, M. T.; PIRES, E. C. **Influência da variação cíclica de carga hidráulica no comportamento do reator UASB**. In: XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, **Anais...** Paraíba: ABES, 2005.
- CATUNDA, S. Y. C.; DEEP, G. S.; van HAANDEL, A. C.; FREIRE, R. C. S. Métodos alternativos para medição da taxa de consumo de oxigênio em sistemas de lodo ativado. **SBA Controle e Automação**, v. 9, n. 2, p. 57-64, 1998.
- CAVALCANTI, P. F. F.; MEDEIROS, E. J. S.; SILVA, J. K. M.; van HAANDEL, A. C. Excess sludge discharge frequency for UASB reactors. **Water Science & Technology**, v. 40, n. 8, p. 211-219, 1999.

CHERNICHARO, CARLOS AUGUSTO DE LEMOS. **Reatores anaeróbios**: 2ª ed., Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS – COPASA. **Sistema convencional de tratamento de esgoto**. Disponível em: <<http://www.copasa.com.br>>. Acesso em: 24 set. 2010.

CORDEIRO, G.M. e DEMÉTRIO, C.G.B. “**Modelos Lineares Generalizados e Extensões** (livro em preparação)”. Departamento de Estatística e Informática, UFRPE e ESALQ/USP. 2008.

DICK, R. I., VESILIND, P. A. The Sludge Volume Index - What is it? **Journal of Water Pollution Control Federation**, v. 41, p. 1285-1291, 1969.

DROSTE, R. L. **Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment**. Wiley, New York, 1997.

EKAMA, G. A.; PITMAN, A. R.; SMOLLEN, M.; MARAIS, G. V. R. Secondary settling tanks. Chapter 8 In: Theory, Design and Operation of Nutrient Removal Activated Sludge Processes. **Water Research Commission**, PQ Box 824, Pretoria 0001, RSA. 1984.

FERNANDES, CARLOS. **Esgotos Sanitários**: Reimpressão, João Pessoa: Ed. Universidade Federal da Paraíba, 2000.

FERNANDES, FERNANDO. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico – PROSAB. Santa Catarina. 1999.

JIN, B.; WILÉN, B. M.; LANT, P. A comprehensive insight into floc characteristic and their impact on compressibility and settleability of activated sludge. **Chemical Engineering Journal**, v. 95, p. 221-234, 2003.

JORDÃO, E. P., PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**: 4ª ed., Rio de Janeiro: SEGRAC, 2005.

LEITÃO, R. C. **Robustness of UASB reactors treating sewage under tropical conditions**. Thesis Wageningen, Wageningen University. 168p, 2004.

LEITÃO, R. C.; LOPES, A. C.; van HAANDEL, A. C.; ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. **Sedimentabilidade do lodo de reatores UASB**. In. XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, **Anais...** Paraíba: ABES, 2005.

LEITÃO, R. C.; van HAANDEL, A. C.; ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: a review. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 9, p. 1105-1118, 2006.

LI, J.; HU, B.; ZHENG, P.; QAISAR, M.; MEI, L. Filamentous granular sludge bulking in a laboratory scale UASB reactor. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 9, p. 3431-3438, 2008.

LOPÉZ, F. M. C.; MARTINEZ, F.; ROJAS, M. G.; NOYOLA, R. A.; GÓMEZ, J. Effect of nitrogen loading rate and carbono source on denitrification and sludge settleability in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors. **Water Science and Technology**, v. 40, Issue 8, Pg. 123-130, 1999.

MAGALHÃES, J. F.; VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. **Estudo da padronização da concentração de sólidos na realização do teste de IVL em lodos provenientes de reatores UASB**. XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

MAHMOUD, N.; ZEEMAN, G.; GIJZEN, H.; LETTINGA, G. Solids removal in upflow anaerobic reactors, a review. **Bioresource Technology**, v. 90, p. 1–9, 2003.

MEYSTRE, JOSUÉ DE ALMEIDA. **Partida de um reator UASB, em escala piloto, para tratamento de efluente doméstico: estudo de caso para a região da serra da Mantiqueira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá (MG), 112p, 2007.

MIKI, M. K. Dilemas do UASB. **Revista DAE**, v. 183, p. 25-37, 2010.

O'FLAHERTY, V.; LENS, P. N. L.; BEER, D.; COLLERAN, E. Effect of feed composition and upflow velocity on aggregate characteristics in anaerobic upflow reactors. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 47, n. 2, p. 102-107, 1997.

OLIVEIRA, S. M. A. C., von SPERLING, M. Avaliação de 166 ETes em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte I – Análise de desempenho. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 347-357, 2005.

PASSIG, F. H., CAMPOS, J. R. **Reator anaeróbio híbrido para tratamento de esgoto sanitário.** In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, **Anais...** Mato Grosso do Sul: ABES, p. 1-10, 2005.

PELÁEZ, M. L. S. **Desempenho de reatores UASB expostos a choques de carga hidráulica e diluição de matéria orgânica devidos a eventos de chuva.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

POETSCH, P. B., KOETZ, P. R. Sistema de determinação da atividade metanogênica específica de lodos anaeróbios. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 4, n. 3, p. 161-165, 1998.

POINAPEN, J.; EKAMA, G. A.; WENTZEL, M. C. Biological sulphate reduction with primary sewage sludge in an upflow anaerobic sludge bed (UASB) reactor -Part 4: Bed settling characteristics. **Water SA**, v. 35, n.5, p. 553-560, 2009.

RAMOS, RICARDO AUGUSTO. **Avaliação da influência da operação de descarte de lodo no desempenho dos reatores UASB em estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, UNB, Brasília, 133p, 2008.

RICHARDSON, J. F.; ZAKI, W. N. Sedimentation and fluidization: Part I. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 75, p. 82-100, 1997.

ROCHA, A. L. C. L. **Higienização de lodo anaeróbio de esgoto por meio alcalino estudo de caso da ETE Lages – Aparecida de Goiânia – Goiás.** Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente), Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás (Goiânia), 2009.

SCHWABE, W. K.; LEÃO, M. M. D.; CAVALCANTI, L. F. N. **Tratamento e disposição final de lodos de unidades de tratamento biológico e físico-químico.** In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais...** Paraíba: ABES, 2000.

SIEGEL, S. **Estatística não paramétrica: para as ciências do comportamento.** São Paulo: McGraw-Hill, 1975.

van HAANDEL, A.C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos - um manual para regiões de clima quente**, p.208. 1996.

van LIER, J. B.; RINTALA, J.; SANZ MARTIN, J. L.; LETTINGA, G. Effect of short – term temperature increase on the performance on a mesophilic UASB reactor. **Water Science and Technology**, v. 22, n. 9. p. 183 – 190, 1990.

VERSIANI, B. M.; JORDÃO, E. P.; VOLSCHAN JÚNIOR, I.; DEZOTTI, M. W. C.; AZEVEDO, J. P. S. **Fatores intervenientes no desempenho de um reator UASB submetido a diferentes condições operacionais**. In: XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais...** Paraíba: ABES, 2005.

VESILIND, P. AARNE. Design of prototype thickeners from batch settling tests. **Water and Sewage Works**, v. 115, p. 302-307, 1968.

von SPERLING, MARCOS. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**: 2ª ed., Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

WANNER, O.; GUJER, W. Competition in biofilms. **Water Science Technology**, v. 17, p. 27–44, 1984.

ANEXOS

Ensaio de 0,75m/h

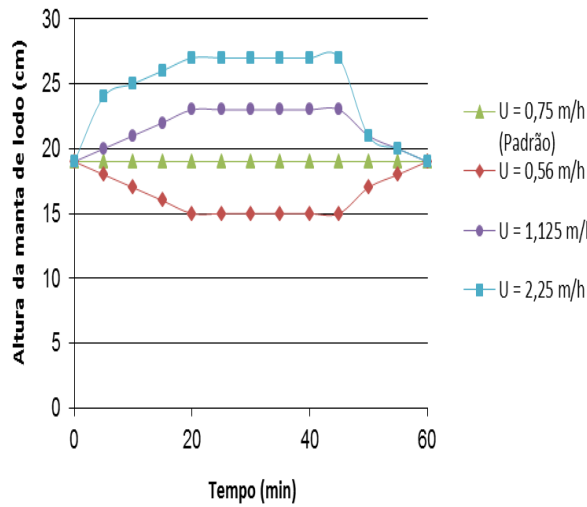


Figura 1 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Aracapé com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

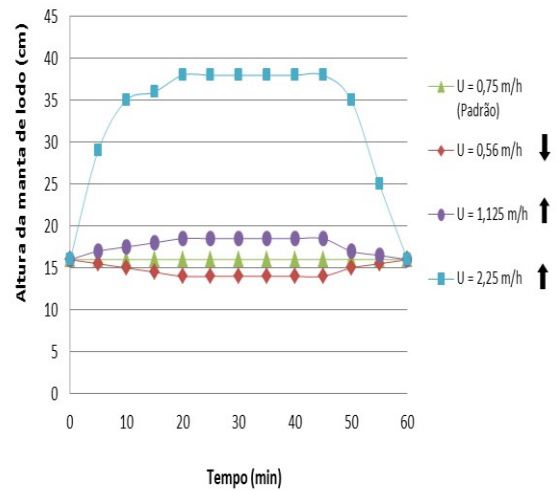


Figura 2 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Novo Barroso com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

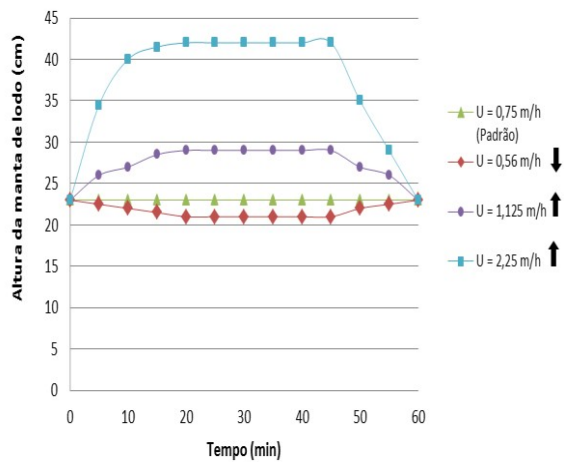


Figura 3 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Riacho Doce com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

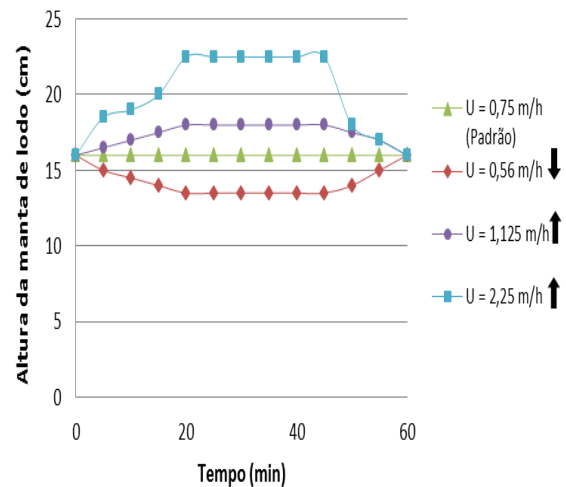


Figura 4 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Curió I com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

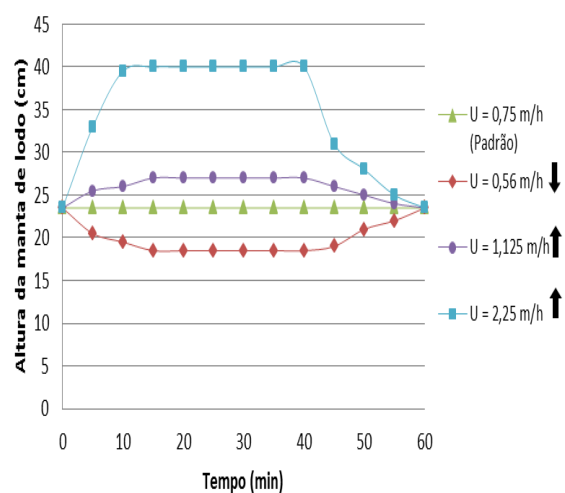


Figura 5 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Paupina com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

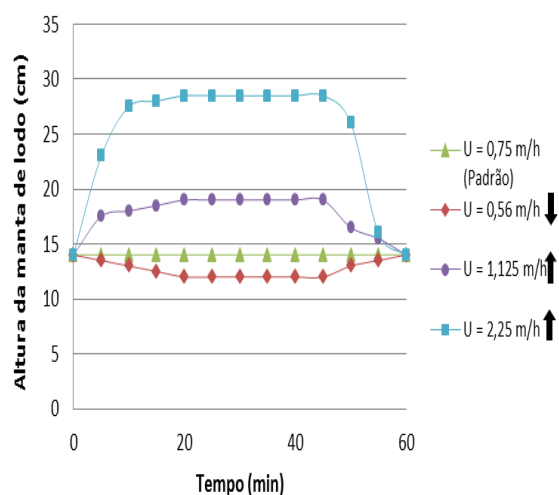


Figura 6 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Zeza do Tijolo com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

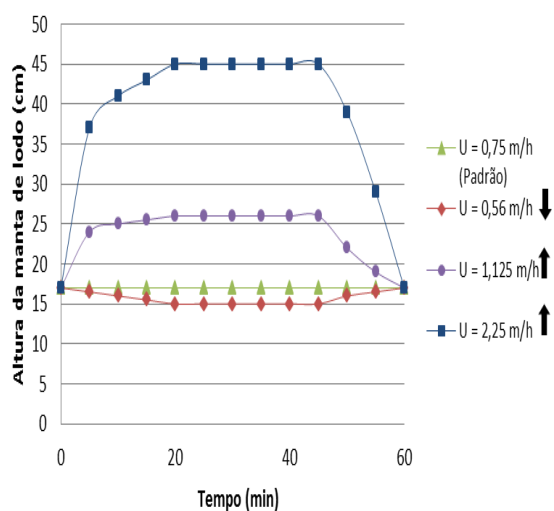


Figura 7 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Pajuçara com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

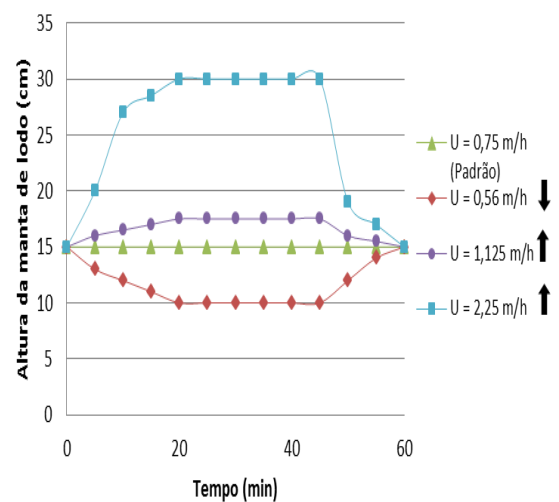


Figura 8 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Sítio Santana com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

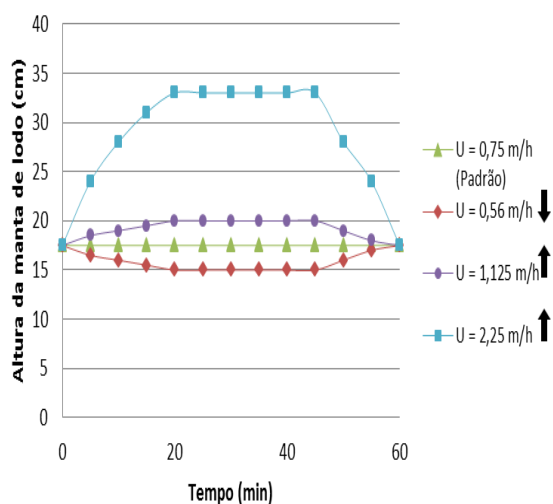


Figura 9 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Curió II com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

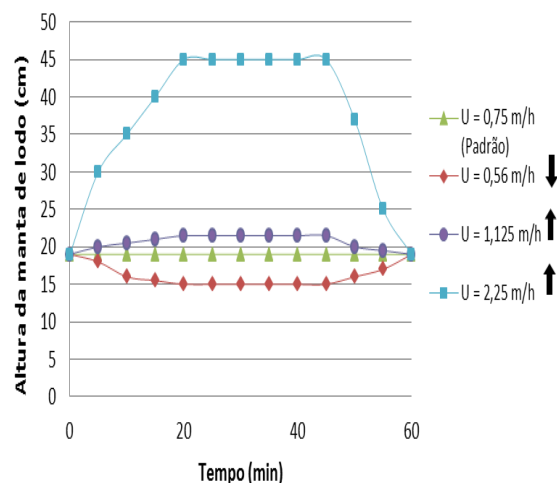


Figura 10 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Heineken com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

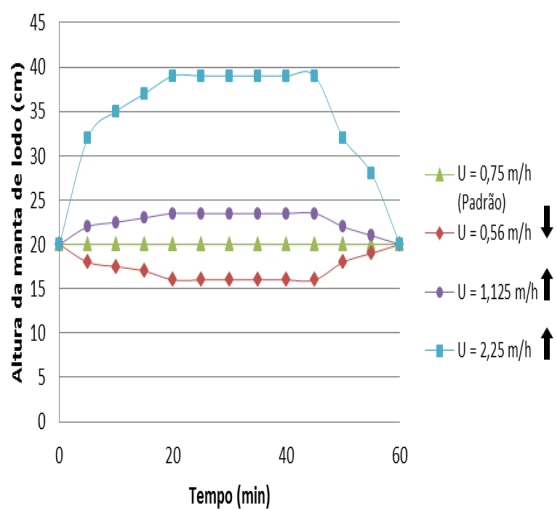


Figura 11 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-São Francisco com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

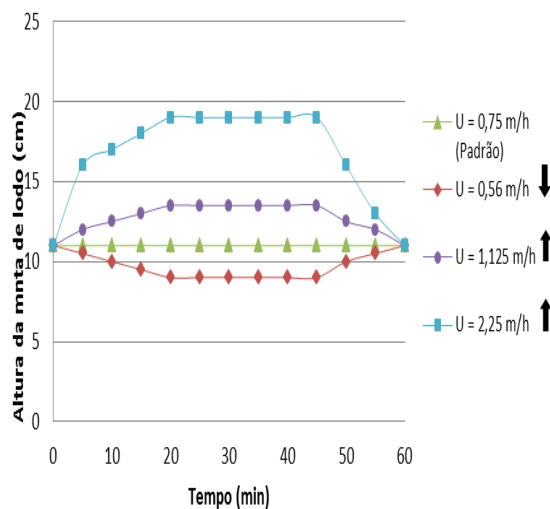


Figura 12 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Pôr-do-Sol com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

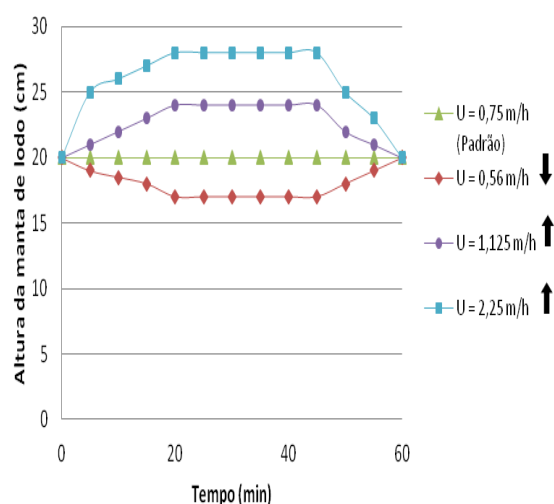


Figura 13 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Guaramiranga com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

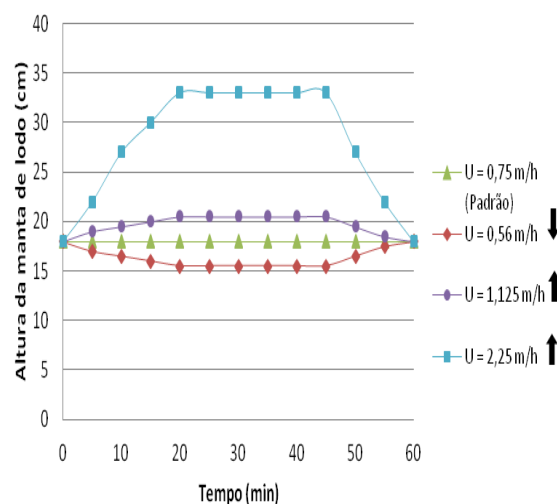


Figura 14 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Aratuba com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

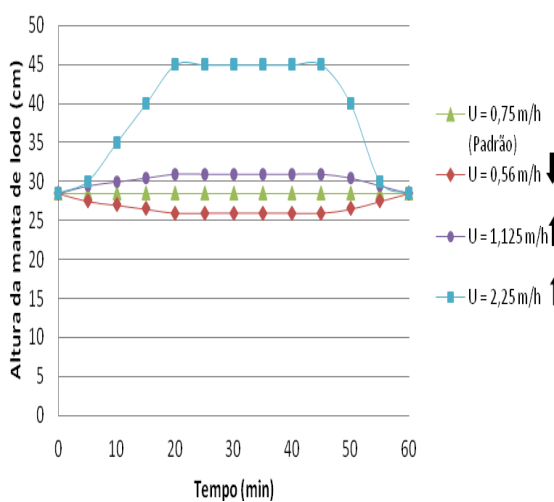


Figura 15 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Mulungu com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

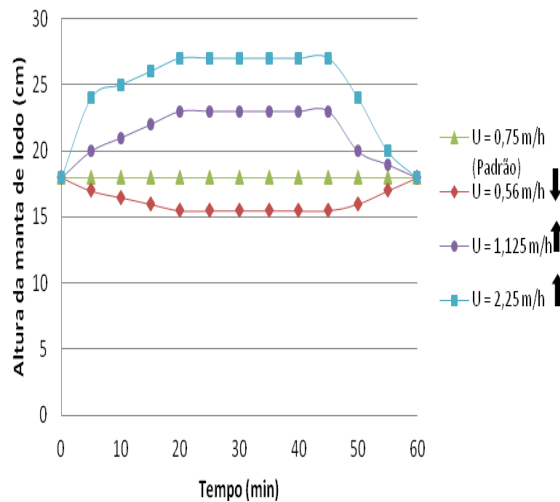


Figura 16 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Cascavel com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

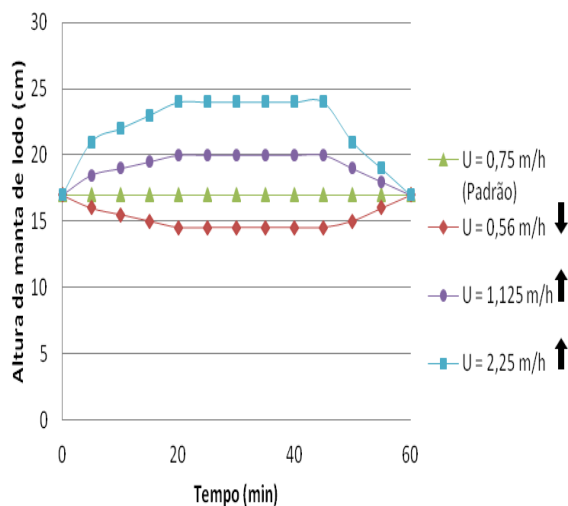


Figura 17 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Rosalina com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

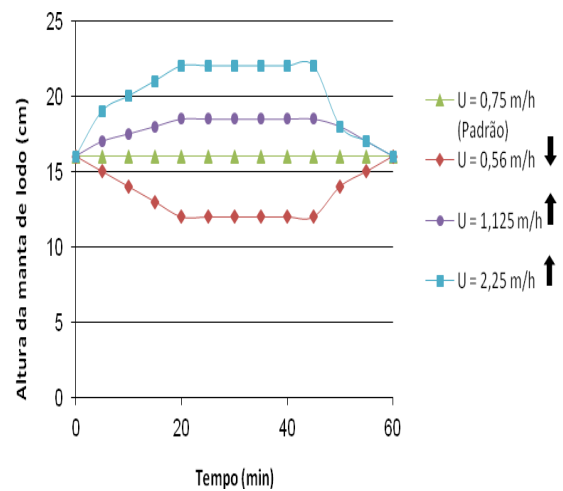


Figura 18 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Dakota-Maranguape com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

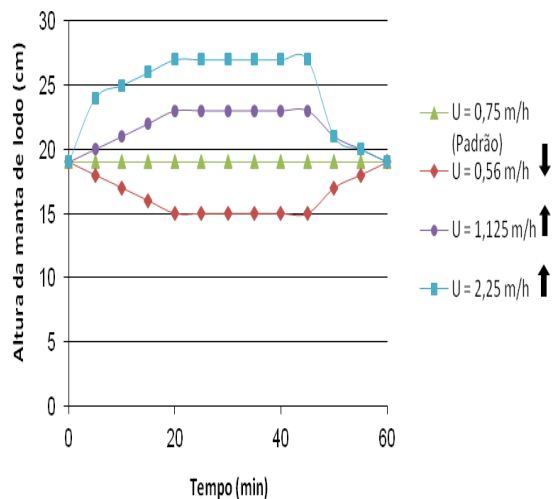


Figura 19 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Pedro Câmara com velocidade ascensional padrão de 0,75m/h (segunda etapa).

Ensaio de 1,125m/h

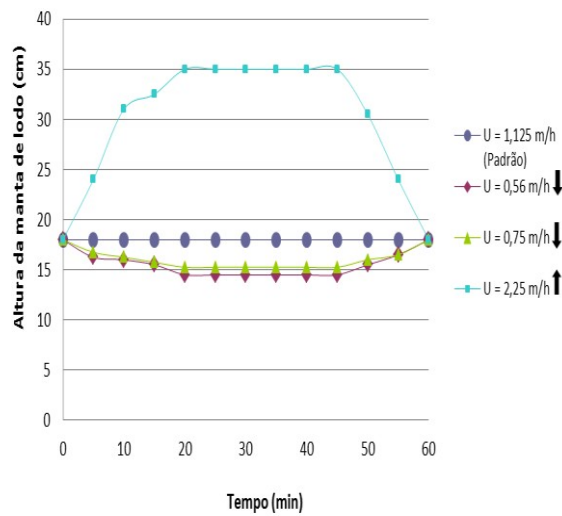


Figura 20 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Aracapé com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

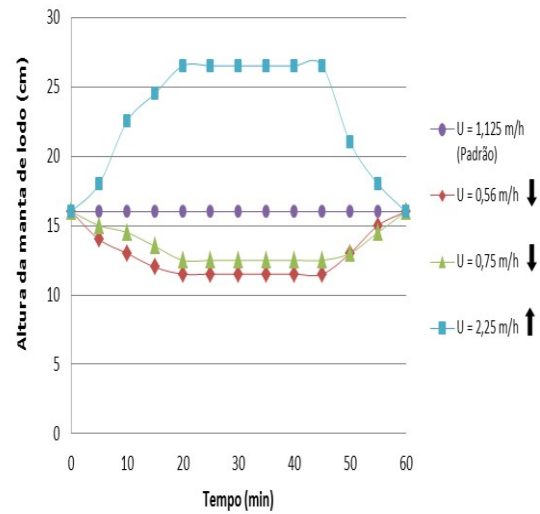


Figura 21 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Novo Barroso com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

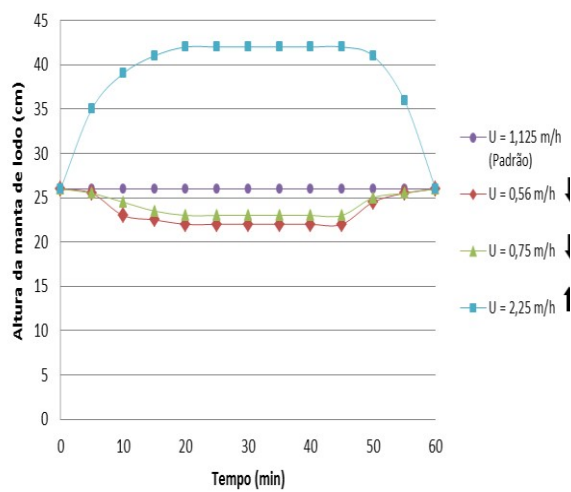


Figura 22 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Riacho Doce com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

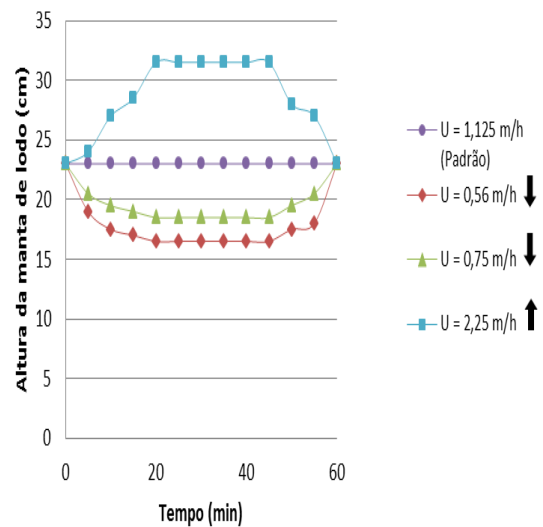


Figura 23 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Curió I com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

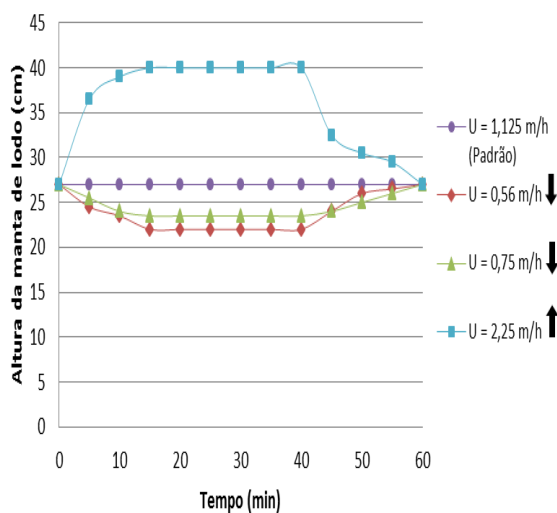


Figura 24 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Paupina com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

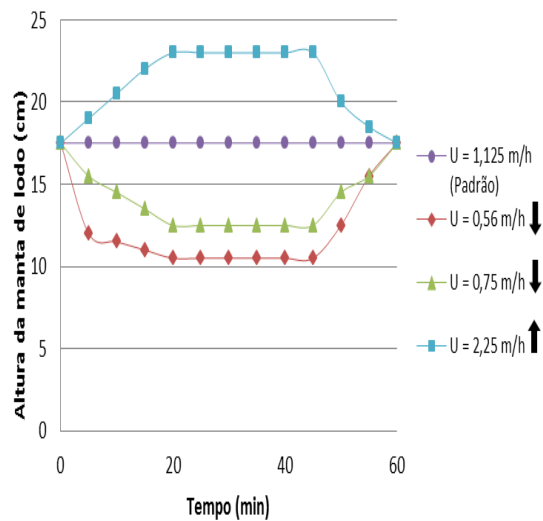


Figura 25 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Zeza do Tijolo com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

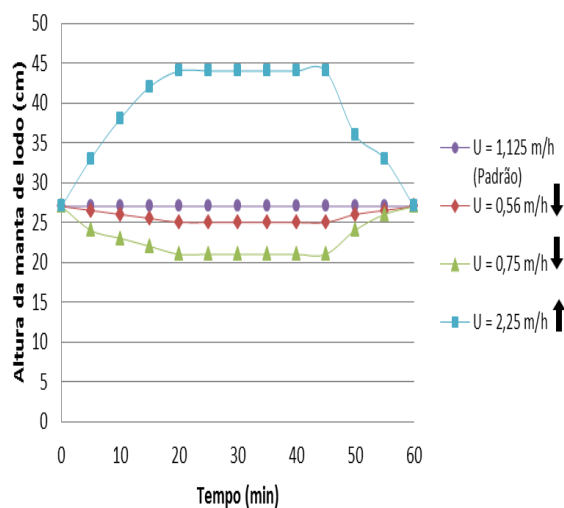


Figura 26 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Pajuçara com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

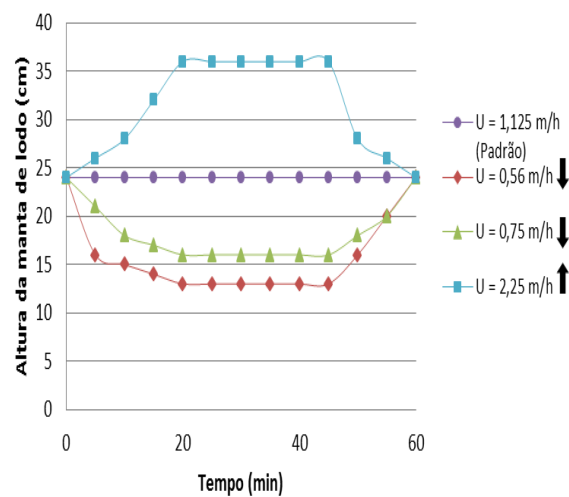


Figura 27 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Sítio Santana com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

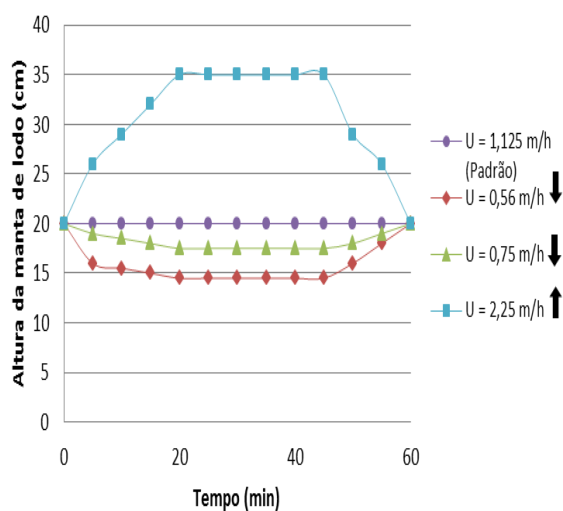


Figura 28 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Curió II com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

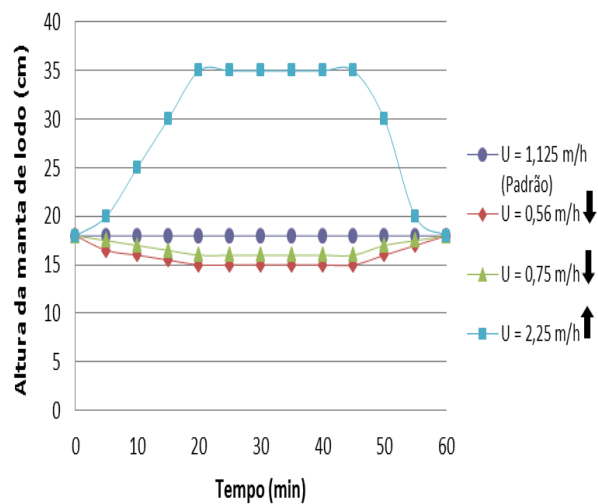


Figura 29 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Heineken com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

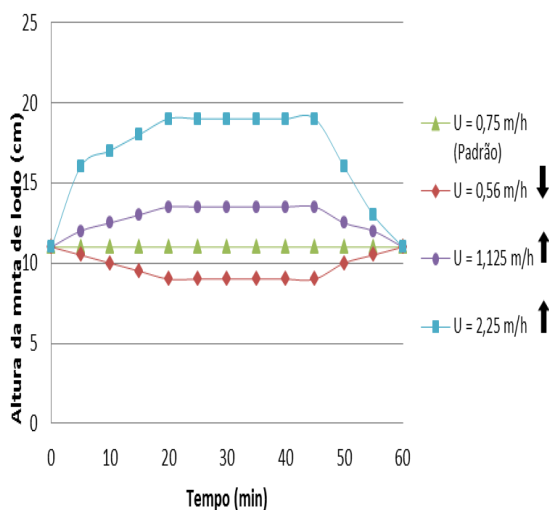


Figura 30 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-São Francisco com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

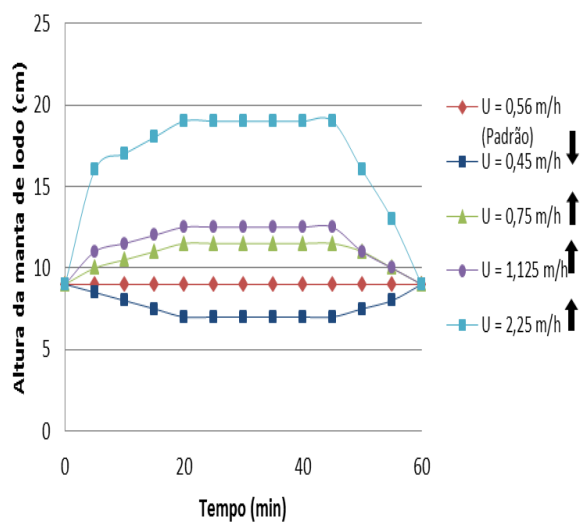


Figura 31 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Pôr-do-Sol com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

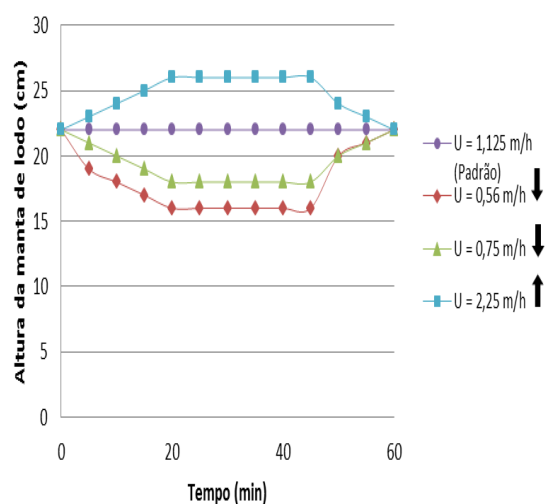


Figura 32 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Guaramiranga com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

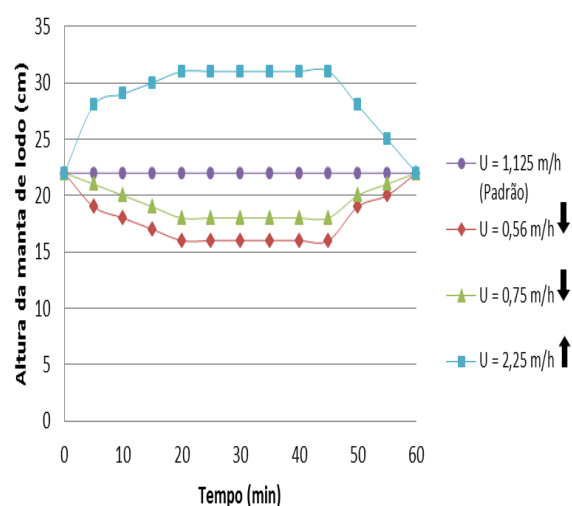


Figura 33 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Aratuba com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

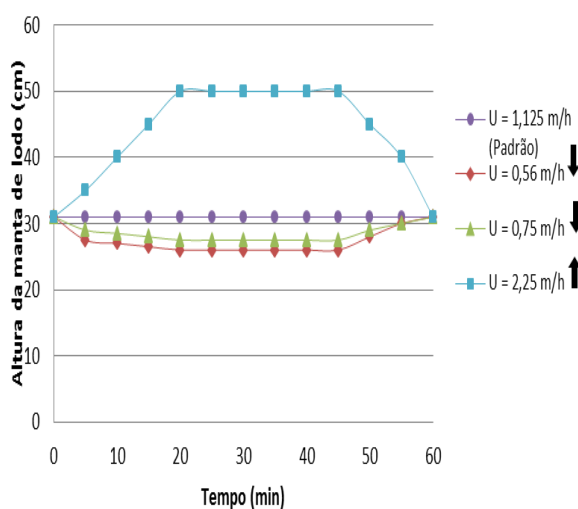


Figura 34 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Mulungu com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

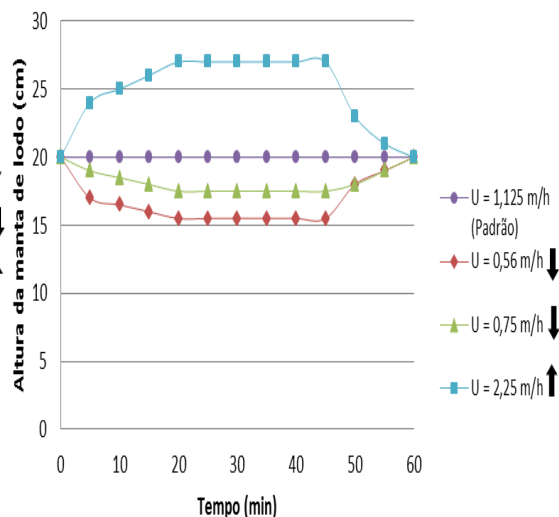


Figura 35 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Cascavel com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

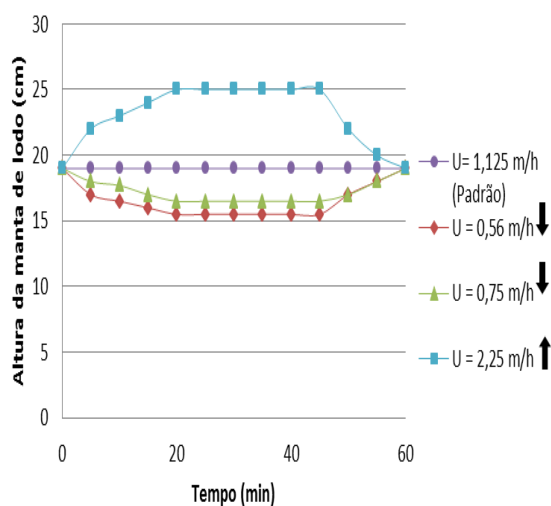


Figura 36 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Rosalina com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

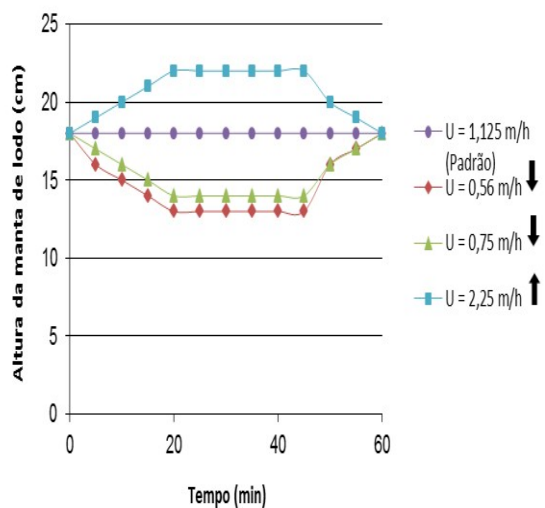


Figura 37 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Dakota-Maranguape com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

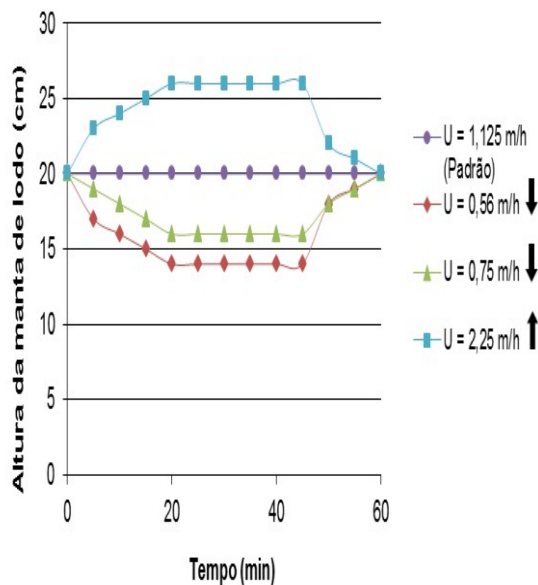


Figura 38 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Pedro Câmara com velocidade ascensional padrão de 1,125m/h (terceira etapa).

Ensaio de 2,25m/h

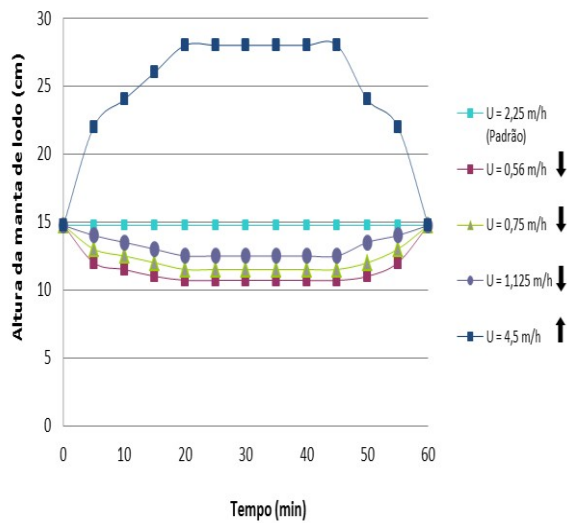


Figura 39 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Aracapé com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h da ETE-Novo Barroso com velocidade ascensional (quarta etapa).

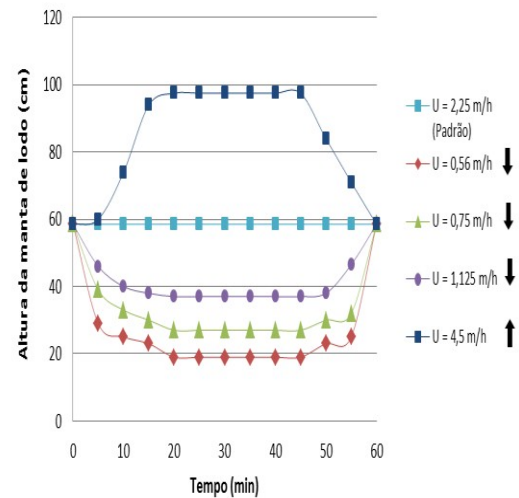


Figura 40 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Novo Barroso com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).

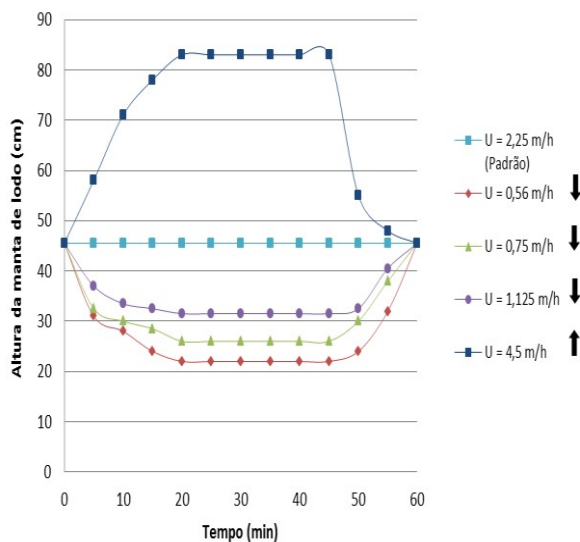


Figura 41 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Riacho Doce com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).

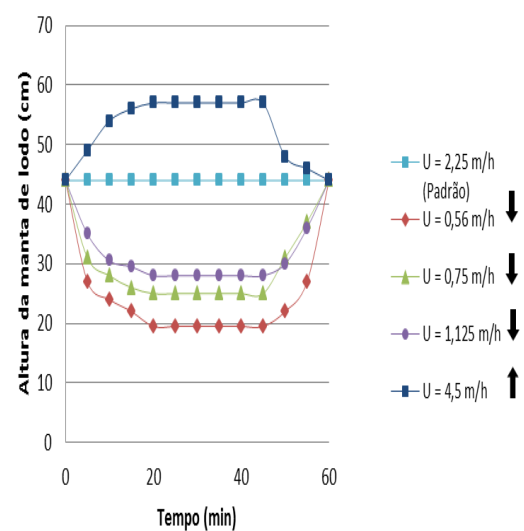


Figura 42 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Curió I com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).

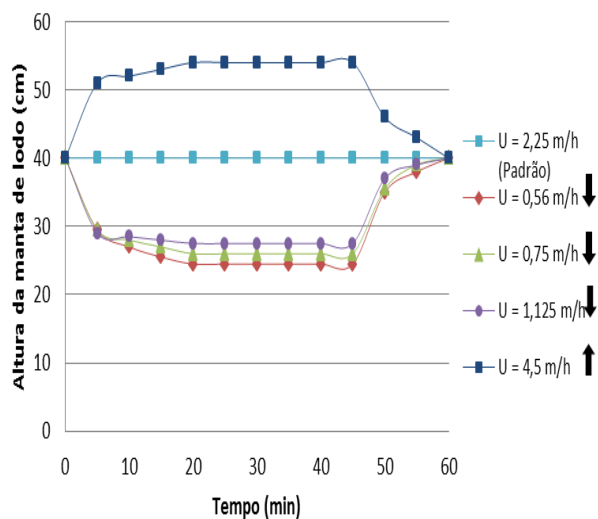


Figura 43 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Paupina com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).

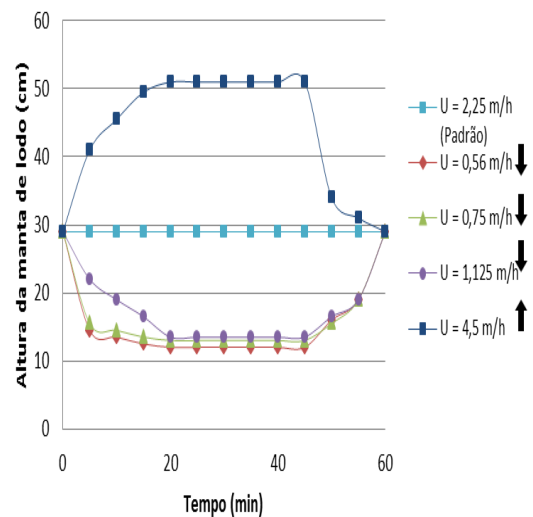


Figura 44 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Zeza do Tijolo com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).

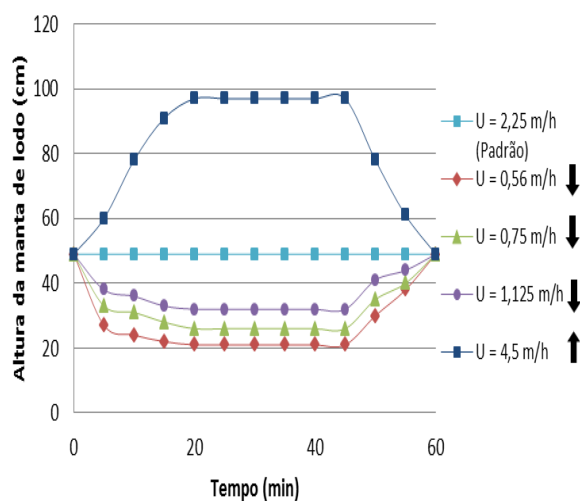


Figura 45 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Pajuçara com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).

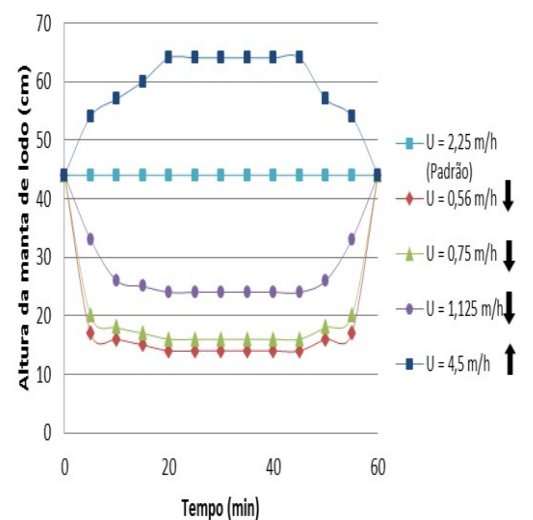


Figura 46 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Sítio Santana com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).

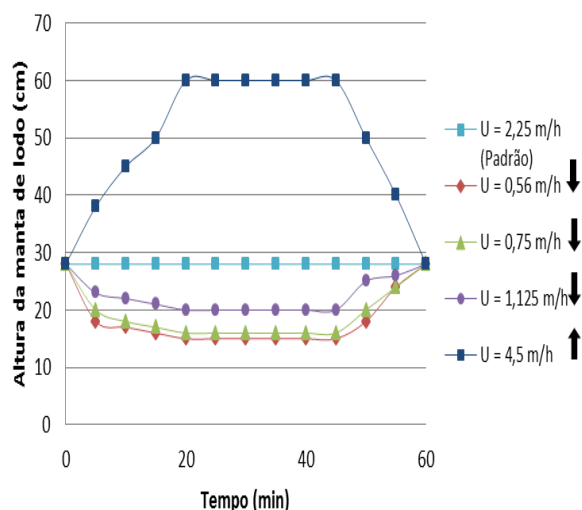


Figura 47 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Curió II com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h da ETE-Heineken com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).

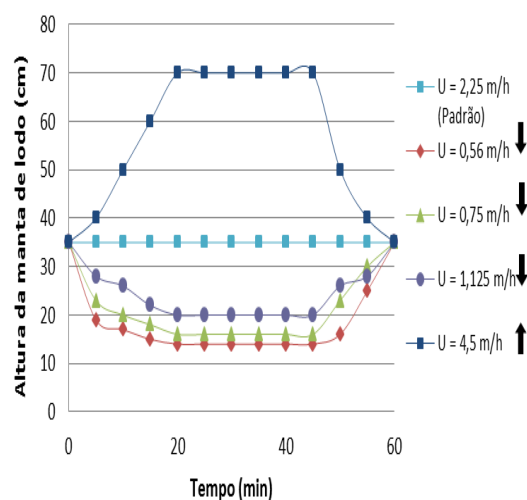


Figura 48 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Heineken com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).

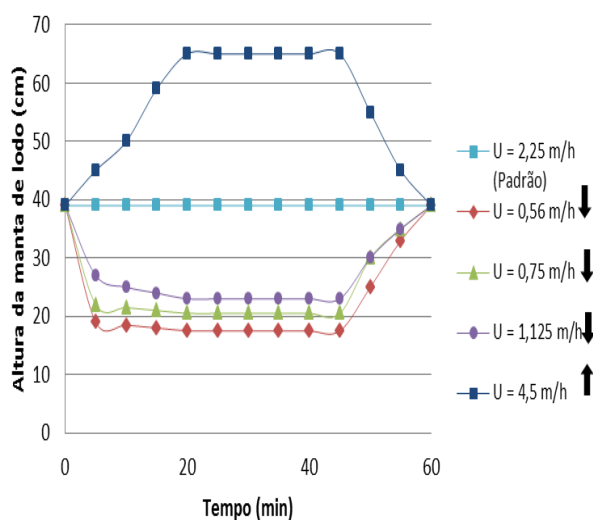


Figura 49 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-São Francisco com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).

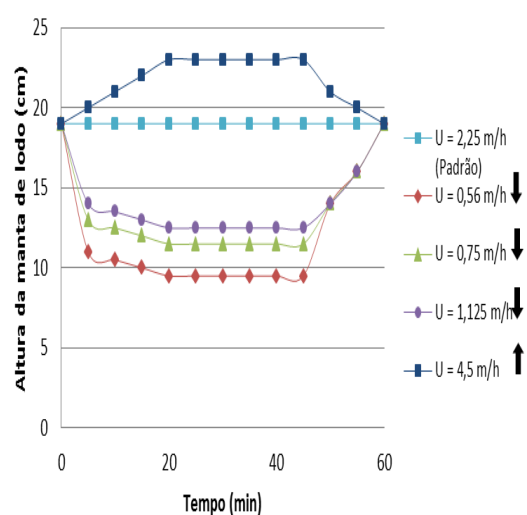


Figura 50 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Pôr-do-Sol com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).

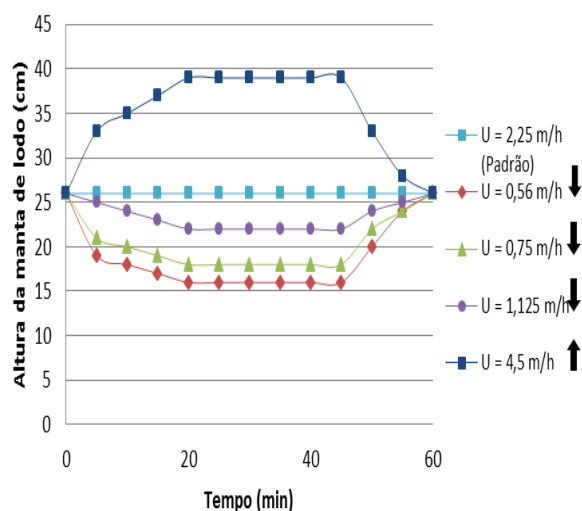


Figura 51 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Guaramiranga com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).

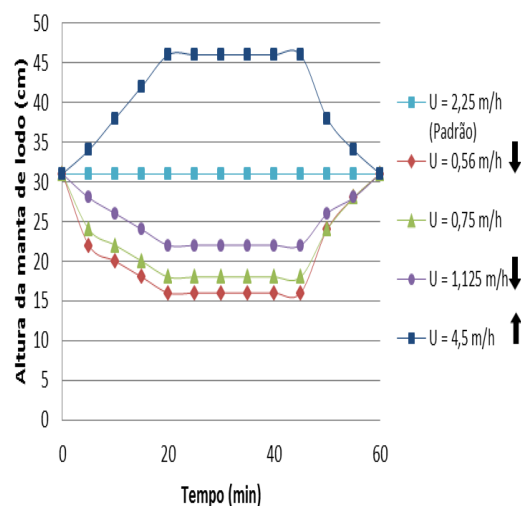


Figura 52 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Aratuba com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).

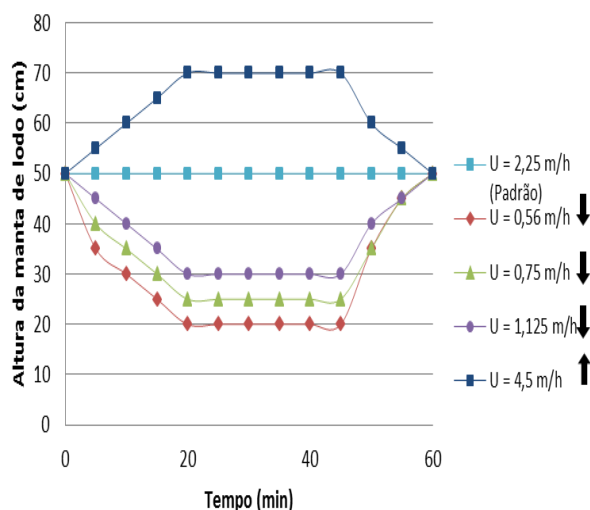


Figura 53 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Mulungu com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).

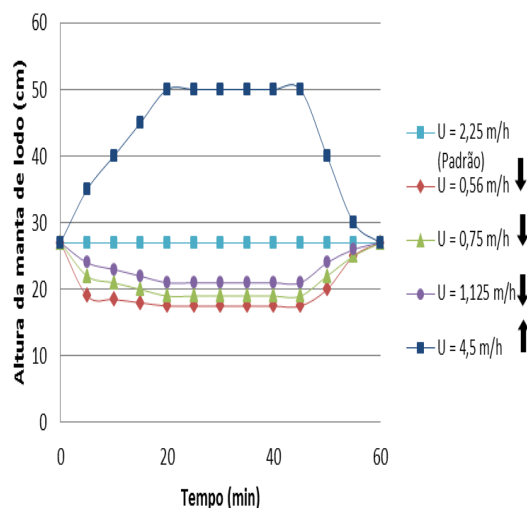


Figura 54 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Cascavel com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).

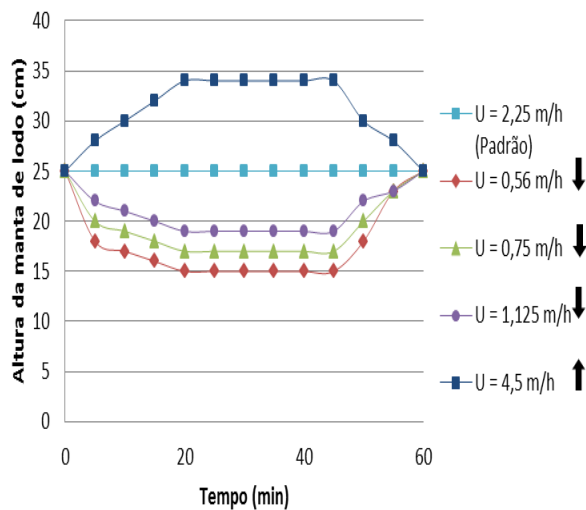


Figura 55 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Rosalina com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).

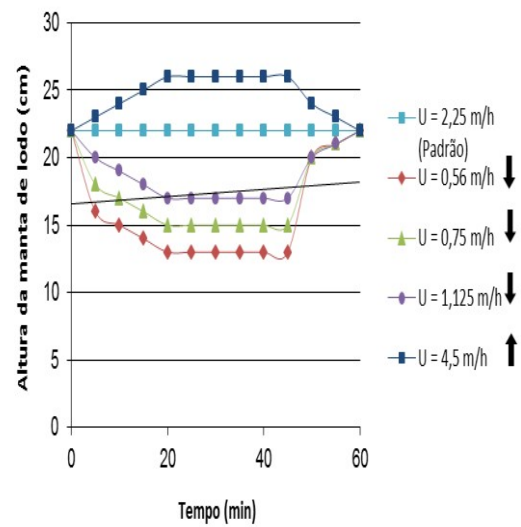


Figura 56 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Dakota-Maranguape com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).

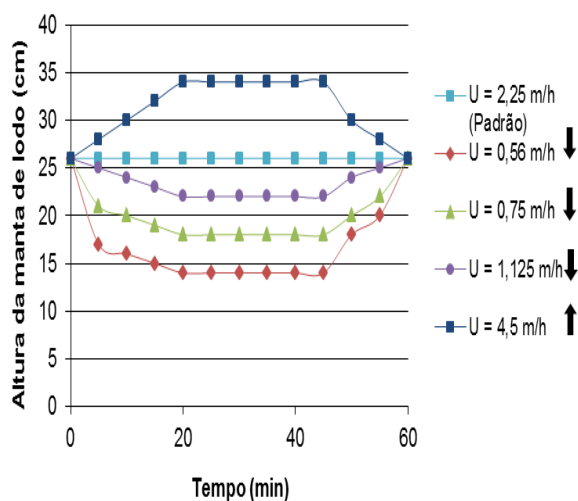


Figura 57 - Ensaio de sedimentabilidade do lodo da ETE-Pedro Câmara com velocidade ascensional padrão de 2,25m/h (quarta etapa).